

Логика современной физики

П. В. Бриджмен

THE LOGIC OF MODERN PHYSICS

BY

P. W. BRIDGMAN

HOLLIS PROFESSOR OF MATHEMATICS AND NATURAL HISTORY
IN HARVARD UNIVERSITY

New York

THE MACMILLAN COMPANY

Электронная книга проекта "Гутенберг" по логике современной физики

Эта электронная книга предназначена для использования любым человеком в любой точке Соединенных Штатов и большинства других частей мира бесплатно и практически без каких-либо ограничений. Вы можете скопировать его, раздать или повторно использовать в соответствии с условиями лицензии Project Gutenberg, прилагаемой к этой книге, или онлайн по адресу www.gutenberg.org. Если вы находитесь за пределами Соединенных Штатов, вам необходимо ознакомиться с законами страны, в которой вы находитесь, прежде чем использовать эту электронную книгу.

Название: Логика современной физики

Автор: П. В. Бриджман

Дата выхода: 22 апреля 2023 [Электронная книга №70620]

Язык: Английский

Оригинальная публикация: Соединенные Штаты: Компания Macmillan, 1927

Кредиты: Лаура Натал Родригес (Изображения предоставлены цифровой библиотекой Hathi Trust).

*** НАЧАЛО ПРОЕКТА "ЭЛЕКТРОННАЯ КНИГА ГУТЕНБЕРГА " ЛОГИКА СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ "

ЛОГИКА СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

АВТОР П. В. БРИДЖМАН

**ХОЛЛИС ПРОФЕССОР МАТЕМАТИКИ И ЕСТЕСТВЕННОЙ ИСТОРИИ ГАРВАРДСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

НЬЮ - ЙОРК КОМПАНИЯ MACMILLAN

АВТОРСКОЕ ПРАВО, 1927,
Компанией MACMILLAN COMPANY.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Этот экскурс в область фундаментальной критики человека, чья деятельность до сих пор почти полностью ограничивалась экспериментами, не является свидетельством старческого увядания, как можно было бы цинично предположить. Я всегда, на протяжении всей моей экспериментальной работы, ощущал настоятельную потребность в лучшем понимании основ нашего физического мышления и в течение длительного времени предпринимал более или менее бессистемные попытки достичь такого понимания. Однако только сейчас, после полугодового творческого отпуска, у меня появилось время попытаться составить более или менее упорядоченное изложение.

Несмотря на предыдущие работы по общим основам Клиффорда, Сталло, Маха и Пуанкаре, и это лишь некоторые из них, я полагаю, что новое эссе такого критического характера не нуждается в извинениях. Ибо, совершенно независимо от вопроса о том, можно ли придерживаться многих точек зрения, изложенных в этих эссе, открытие новых фактов в области теории относительности и квантовой теории сместило центр интереса и акценты. Вся недавняя деятельность в области новой квантовой механики, по-видимому, требует нового изучения фундаментальных вопросов, которое должно признать, по крайней мере косвенно, существование особых явлений квантовой области. Однако необходимость повторного рассмотрения вовсе не означает, что многие результаты предыдущей критики могут все еще не быть приняты; некоторые из этих результатов настолько основательно вошли в физическое мышление, что мы можем принять их без упоминания. Таким образом, фундаментальной позицией этого эссе является эмпиризм, который теперь оправдывается как позиция физика в значительной степени исследованием физиологического происхождения наших концепций пространства, времени и механики, которым в основном были посвящены предыдущие эссе.

Ни в одном из предыдущих эссе сознательно или непосредственно не затрагивались детали этого; фактически, я не читал ни одного из них в течение нескольких лет. Если приведенные здесь отрывки напоминают уже написанные отрывки, то это потому, что идеи были усвоены, а точное происхождение забыто; вероятно, стоит оставить такие отрывки без пересмотра, потому что такие идеи приобретают правдоподобие благодаря тому, что их сочли приемлемыми для независимого мышления.

Я в большом долгу перед профессором Р. Ф. Альфредом Хорнле с философского факультета Йоханнесбургского университета, Южная Африка, за предложение нескольких модификаций, призванных сделать текст более приемлемым для философа, и небольшие дополнения в интересах читателей, не знакомых со всеми деталями последних технических достижений в физике.

Введение

Одним из наиболее примечательных изменений в современной физике является изменение отношения к тому, что можно назвать интерпретативным аспектом физики. Как в трудах, так и в разговорах физиков все чаще признается, что мир эксперимента непостижим без некоторого изучения цели физики и природы ее фундаментальных концепций. Нет ничего нового в попытках более критического понимания природы физики, но до недавнего времени ко всем таким попыткам относились с определенным подозрением или даже иногда презрением. Средний физик, скорее всего, преуменьшит свою озабоченность подобными вопросами и склонен отмахиваться от спекуляций коллег-физиков, используя эпитет "метафизический". Такое отношение, без сомнения, имело определенное оправдание в полной непонятности для физика многих метафизических спекуляций и бесплодности таких спекуляций с точки зрения получения физических результатов. Однако растущая реакция в пользу лучшего понимания интерпретирующих основ физики - это не маятниковое колебание стиля мышления в сторону метафизики, происходящее из-за переворота моральных ценностей, вызванного великой войной, или чего-либо подобного, но это реакция, которая абсолютно навязана нам быстро растущим массивом холодных экспериментальных фактов.

Эта реакция, или, скорее, новое движение, без сомнения, было инициировано ограниченной теорией относительности Эйнштейна. До Эйнштейна постоянно растущее число экспериментальных фактов, касающихся быстро движущихся тел, требовало все более сложных модификаций наших наивных представлений, чтобы сохранить самосогласованность, пока Эйнштейн не показал, что все может быть восстановлено до удивительной простоты путем небольшого изменения некоторых наших фундаментальных концепций. Концепции, которых Эйнштейн наиболее явно коснулся, были концепциями пространства и времени, и большая часть работ, сознательно вдохновленных Эйнштейном, была посвящена этим концепциям. Но этот эксперимент требует критического анализа гораздо большего, чем концепции пространства и времени, и становится все более очевидным благодаря всем новым фактам, открываемым в квантовой области.

Ситуация, представленная нам этими новыми квантовыми фактами, двоякая. Во-первых, все эти эксперименты связаны с вещами настолько малыми, что они навсегда остаются за пределами возможности прямого опыта, так что у нас возникает проблема перевода результатов эксперимента на другой язык. Таким образом, мы наблюдаем эмиссионную линию в спектрографе и можем сделать вывод о переходе электрона с одного энергетического уровня в атоме на другой. Во-вторых, у нас возникает проблема понимания переведенных экспериментальных данных. Теперь, конечно, каждый знает, что эта проблема создает для нас наибольшие трудности. Экспериментальные факты настолько сильно отличаются от фактов нашего обычного опыта, что нам, по-видимому, не только приходится отказываться от обобщений прошлого опыта, таких широких, как, например, уравнения поля электродинамики, но даже ставится под сомнение применимость наших обычных форм мышления в новой области; часто предполагается, например, что понятия пространства и времени рушатся.

Ситуация стремительно обостряется. С тех пор как я начал писать это эссе, наблюдается поразительный рост критической активности, вдохновленной новой квантовой механикой 1925-26 годов, и часто можно услышать изложение новых идей, предваряемое анализом того, что на самом деле дает нам эксперимент или что на самом деле означают наши фундаментальные

концепции. Изменение идей сейчас происходит настолько быстро, что ряд утверждений этого эссе уже устарели как выражение наилучшего текущего мнения; однако я оставил эти утверждения в силе, поскольку фундаментальные аргументы никоим образом не затронуты, и у нас нет оснований думать, что существующие наилучшие мнения в какой-либо мере окончательны. У нас складывается впечатление, что мы находимся в важном периоде становления; если это так, то облик физики на долгое время в будущем будет определяться нашим нынешним отношением к фундаментальным вопросам интерпретации. Для удовлетворения этой ситуации мне кажется, что нечто большее, чем рука-в-рот философии, что сейчас растут, чтобы удовлетворить особые чрезвычайные ситуации, что-то приближается более внимательно к систематической философии все физики, которые распространяются экспериментальные домены уже консолидированы, а также те, которые сейчас делают нам столько хлопот. В этом эссе предпринята попытка дать более или менее всеобъемлющую критику всей физики. Наша проблема заключается в двойном: в понимании того, что мы пытаемся сделать и какими должны быть наши идеалы в физике, и в понимании природы структуры физики в том виде, в каком она существует сейчас. Этим двум целям вместе способствует анализ фундаментальных концепций физики; понимание концепций, которыми мы располагаем, раскрывает нынешнюю структуру физики, а осознание того, какими должны быть эти концепции, предполагает идеалы физики. Это эссе будет в основном посвящено фундаментальным концепциям; окажется, что почти все концепции могут извлечь пользу из повторного рассмотрения.

Материал этого эссе в значительной степени получен путем наблюдения за актуальными течениями мнений в физике; многое из того, что я должен сказать, является более или менее общим достоянием, и, несомненно, каждый читатель найдет отрывки, которые, как ему покажется, были вырваны из его собственных уст. Однако в отношении некоторых широких тенденций в современной физике я дал свою собственную интерпретацию, и более чем вероятно, что эта интерпретация будет неприемлема для многих. Но даже если это неприемлемо, я надеюсь, что стимул для борьбы с предложенными здесь идеями может оказаться полезным.

Для того, чтобы наш запрос не выходил за рамки допустимого, необходимо будет установить определенные ограничения. Конечно, это чистейший трюизм, что все наши экспериментальные знания и наше понимание природы невозможны и не существуют отдельно от наших собственных ментальных процессов, так что, строго говоря, ни один аспект психологии или эпистемологии не лишен актуальности. К счастью, мы сможем обойтись с более или менее наивным отношением ко многим из этих вопросов. Мы примем как значимое наше суждение здравого смысла о том, что существует внешний по отношению к нам мир, и, насколько это возможно, ограничим наше исследование поведением и интерпретацией этого "внешнего" мира. Мы исключим исследования наших состояний сознания как таковых. Однако, несмотря на самые благие намерения, мы не сможем полностью исключить соображения, отдающие метафизикой, потому что очевидно, что природа нашего мыслительного механизма существенно окрашивает любую картину, которую мы можем сформировать о природе, и нам придется признать, что таким образом навязываются неизбежные характеристики любого нашего мировоззрения.

Содержание

Предисловие

Введение

ГЛАВА

I. ШИРОКИЕ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Всегда возможны новые виды опыта
Операционный характер концепций
Вклад Эйнштейна в изменение нашего отношения
к концепциям
Подробное обсуждение концепции протяженности
Относительный характер знаний
Бессмысленные вопросы
Общие замечания по операционной точке
зрения

II. ДРУГИЕ ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Приблизительный характер эмпирического знания
Объяснения и механизмы
Моделей и конструктов
Роль математики в физике

III. ПОДРОБНОЕ РАССМОТРЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕПЦИЙ ФИЗИКИ

Концепции пространства
Концепции времени
Концепции причинности
Концепции идентичности
Концепции скорости
Концепций силы и массы
Концепции энергии
Концепций термодинамики
Электрических концепций
Природы света и Концепций относительности
Других концепций относительности
Вращательного движения и
квантовых концепций

IV. ОСОБЫЕ ВЗГЛЯДЫ На ПРИРОДУ

Простота Природы

Детерминизм

О возможности полного описания природы

в терминах анализа

Взгляд вперед

УКАЗАТЕЛЬ

ЛОГИКА СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

ГЛАВА I

ОБЩИЕ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

КАКИМ бы ни было чье-либо мнение относительно нашего постоянного принятия аналитических деталей ограниченной и общей теорий относительности Эйнштейна, не может быть никаких сомнений в том, что благодаря этим теориям физика постоянно меняется. Для нас было большим потрясением обнаружить, что классические концепции, принимаемые бесприкословно, оказались неадекватными реальной ситуации, и потрясение от этого открытия привело к критическому отношению ко всей нашей концептуальной структуре, которая должна, по крайней мере частично, быть постоянной. Размышления о ситуации после события показывают, что не должны были требоваться новые экспериментальные факты, которые привели к теории относительности, чтобы убедить нас в неадекватности наших предыдущих концепций, но достаточно тщательный анализ должен был подготовить нас, по крайней мере, к возможности того, что сделал Эйнштейн.

Заглядывая сейчас в будущее, наши представления о том, что такое внешняя природа, всегда будут подвержены изменениям по мере получения новых экспериментальных знаний, но есть часть нашего отношения к природе, которая не должна подвергаться изменениям в будущем, а именно та часть, которая покоится на постоянной основе характера нашего разума. Именно здесь, в улучшенном понимании наших ментальных отношений с природой, можно обнаружить постоянный вклад теории относительности. Теперь мы должны взять на себя задачу настолько глубоко понять характер наших постоянных ментальных отношений с природой, чтобы другое изменение в нашем отношении, подобное тому, которое произошло благодаря Эйнштейну, было навсегда невозможно. Возможно, было простительно, что революция в мировоззрении произошла однажды, потому что, в конце концов, физика - молодая наука, и физики были очень

заняты, но, безусловно, было бы упреком, если бы такая революция когда-нибудь снова оказалась необходимой.

ВСЕГДА ВОЗМОЖНЫ НОВЫЕ ВИДЫ ВПЕЧАТЛЕНИЙ

Первый урок нашего недавнего опыта работы с теорией относительности - это просто усиление и подчеркивание урока, которому также научил весь прошлый опыт, а именно, что когда эксперимент переносится в новые области, мы должны быть готовы к новым фактам, совершенно отличающимся по характеру от тех, что были в нашем предыдущем опыте. Этому учит не только открытие тех неожиданных свойств материи, движущейся с высокими скоростями, которые вдохновили теорию относительности, но и, что еще более важно, новые факты в квантовой области. В определенной степени, конечно, признание всего этого не предполагает изменения прежнего отношения; *факт* всегда был для физика единственной конечной вещью, к которой нельзя апеллировать и перед лицом которой единственно возможной позицией является смирение, почти религиозное. Новой чертой в нынешней ситуации является усилившаяся убежденность в том, что в реальности действительно существуют новые уровни опыта и что мы можем ожидать, что будем постоянно сталкиваться с ними. Мы уже сталкивались с новыми явлениями при переходе к высоким скоростям и к малым масштабам величины: мы можем аналогичным образом ожидать обнаружить их, например, при рассмотрении соотношений космических величин или при изучении свойств материи огромных плотностей, такой, которая, как предполагается, существует в звездах.

Это признание возможности нового опыта за пределами нашего нынешнего диапазона подразумевает признание того, что ни один элемент физической ситуации, каким бы явно неуместным или тривиальным он ни был, не может быть отброшен как не влияющий на конечный результат, пока не будет доказано, что он не влияет на реальный эксперимент.

Следовательно, позиция физика должна быть позицией чистого эмпиризма. Он не признает *априорных* принципов, которые определяют или ограничивают возможности нового опыта. Опыт определяется только опытом. Это практически означает, что мы должны отказаться от требования, чтобы вся природа была охвачена какой-либо формулой, простой или сложной. Возможно, в конце концов окажется, что на самом деле природу можно охватить формулой, но мы должны так организовать наше мышление, чтобы не требовать этого как необходимости.

ОПЕРАЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР КОНЦЕПЦИЙ

Вклад Эйнштейна в изменение нашего отношения к концепциям

Признавая существенную непредсказуемость эксперимента за пределами наших нынешних возможностей, физик, если он хочет избежать постоянного пересмотра своего отношения, должен использовать при описании и соотнесении природы концепции такого характера, чтобы наш нынешний опыт не становился заложником будущего. Теперь мне кажется, что это величайший вклад Эйнштейна. Хотя он сам прямо не заявляет и не подчеркивает этого, я полагаю, что изучение того, что он сделал, покажет, что он существенно изменил наш взгляд на то, какими являются и должны быть концепции, полезные в физике. До сих пор многие концепции физики определялись в терминах их свойств. Прекрасным примером является концепция Ньютона об абсолютном времени. Следующая цитата из Схолии в книге I "Принципов" проливает свет на это:

Я не определяю Время, Пространство, Место или Движение как хорошо известные всем. Только я должен заметить, что вульгарные люди постигают эти величины только исходя из отношения, которое они имеют к чувственным объектам. Отсюда возникают определенные предрассудки, для устранения которых будет удобно разделить их на Абсолютные и Относительные, Истинные и Кажущиеся, Математические и Общепринятые.

(I) абсолютное, Истинное и математическое Время само по себе и по своей собственной природе течет равномерно, независимо от чего-либо внешнего, и по-другому называется Длительностью.

Теперь нет никакой гарантии, что в природе существует что-либо со свойствами, подобными тем, которые предполагаются в определении, и физика, сведенная к понятиям такого характера, становится такой же чисто абстрактной наукой и такой же далекой от реальности, как абстрактная геометрия математиков, построенная на постулатах. Задача эксперимента состоит в том, чтобы выяснить, соответствуют ли понятия, определенные таким образом, чему-либо в природе, и мы всегда должны быть готовы обнаружить, что понятия ничему не соответствуют или соответствуют лишь частично. В частности, если мы рассмотрим определение абсолютного времени в свете эксперимента, мы не найдем в природе ничего с такими свойствами.

Новое отношение к концепции совершенно иное. Мы можем проиллюстрировать это, рассмотрев концепцию длины: что мы подразумеваем под длиной объекта? Очевидно, мы знаем, что подразумеваем под длиной, если можем сказать, какова длина любого объекта, и от физика больше ничего не требуется. Чтобы определить длину объекта, мы должны выполнить определенные физические операции. Таким образом, понятие длины фиксировано, когда операции, с помощью которых измеряется длина, фиксированы: то есть понятие длины включает в себя столько же и не более, чем набор операций, с помощью которых определяется длина. В общем, под любым понятием мы подразумеваем не что иное, как набор операций; *это понятие является синонимом соответствующего набора операций*. Если концепция физическая, как длина, операции являются реальными физическими операциями, а именно теми, с помощью которых измеряется длина; или если концепция ментальная, как математическая непрерывность, операции являются ментальными операциями, а именно теми, с помощью которых мы определяем, является ли данная совокупность величин непрерывной. Это не означает, что существует четкое разделение между физическими и ментальными

концепциями или что один вид концепций не всегда содержит элемент другого; такая классификация концепций не важна для наших дальнейших рассуждений.

Мы должны требовать, чтобы набор операций, эквивалентных любому понятию, был уникальным набором, поскольку в противном случае в практических приложениях возможны неоднозначности, которые мы не можем допустить.

Применяя эту идею "концепции" к абсолютному времени, мы не поймем значения абсолютного времени, если не сможем сказать, как определить абсолютное время любого конкретного события, *т.е.*, если мы не сможем измерить абсолютное время. Теперь нам просто нужно изучить любую из возможных операций, с помощью которых мы измеряем время, чтобы увидеть, что все такие операции являются относительными операциями. Поэтому предыдущее утверждение о том, что абсолютного времени не существует, заменяется утверждением о том, что абсолютное время не имеет смысла. И, делая это заявление, мы не говорим чего-то нового о природе, а просто выявляем последствия, уже содержащиеся в физических операциях, используемых для измерения времени.

Очевидно, что если мы примем эту точку зрения на понятия, а именно, что правильное определение понятия дается не в терминах его свойств, а в терминах реальных операций, нам не грозит опасность пересмотра нашего отношения к природе. Ибо, если опыт всегда описывается в терминах опыта, то всегда должно быть соответствие между опытом и нашим его описанием, и нам никогда не нужно смущаться, как это было при попытке найти в природе прототип ньютоновского абсолютного времени. Более того, если мы вспомним, что операции, которым эквивалентна физическая концепция, являются реальными физическими операциями, эти концепции могут быть определены только в рамках реального эксперимента и являются неопределенными и бессмысленными в областях, еще не затронутых экспериментом. Из этого следует, что, строго говоря, мы вообще не можем делать заявлений о регионах, которые еще не затронуты, и что когда мы делаем такие заявления, что неизбежно произойдет, мы делаем традиционную экстраполяцию, слабость которой мы должны полностью осознавать и оправдание которой - в эксперименте будущего.

Вероятно, ни у Эйнштейна, ни у других авторов нет утверждения, что описанное выше изменение в использовании "концепции" было произведено сознательно, но то, что это так, доказывается, я полагаю, изучением того, как Эйнштейн и другие в настоящее время обращаются с концепциями. Ибо, конечно, истинное значение термина можно найти, наблюдая за тем, что человек с ним делает, а не за тем, что он о нем говорит. Мы можем показать, что это реальный смысл, в котором начинает использоваться концепция, рассмотрев, в частности, эйнштейновскую трактовку одновременности.

До Эйнштейна концепция одновременности определялась в терминах свойств. Это было свойство двух событий, когда они описывались с точки зрения их взаимосвязи во времени, заключающееся в том, что одно событие было либо до другого, либо после него, либо одновременно с ним. Одновременность была свойством только двух событий и ничего больше; либо два события были одновременными, либо их не было. Оправданием для использования этого термина таким образом было то, что он, казалось, описывал поведение реальных вещей. Но, конечно, опыт тогда был ограничен узким диапазоном. Когда диапазон опыта был расширен, например, за счет перехода на высокие скорости, было обнаружено, что концепции больше не применимы, потому что в опыте не было аналога для этой абсолютной связи между

двумя событиями. Теперь Эйнштейн подверг концепцию одновременности критическому анализу, который, по сути, состоял в том, чтобы показать, что операции, которые позволяют описать два события как одновременные, включают измерения двух событий, сделанные наблюдателем, так что "одновременность", следовательно, не является абсолютным свойством двух событий и ничем иным, но также должна включать отношение событий к наблюдателю. Следовательно, пока у нас не будет экспериментального доказательства обратного, мы должны быть готовы обнаружить, что одновременность двух событий зависит от их отношения к наблюдателю и, в частности, от их скорости. Эйнштейн, анализируя таким образом то, что связано с вынесением суждения об одновременности, и рассматривая действие наблюдателя как сущность ситуации, фактически принимает новую точку зрения на то, какими должны быть концепции физики, а именно операциональный взгляд.

Конечно, Эйнштейн на самом деле пошел гораздо дальше этого и точно обнаружил, как меняются операции для оценки одновременности при движении наблюдателя, и получил количественные выражения для влияния движения наблюдателя на относительное время двух событий. Мы можем заметить в скобках, что существует большая свобода выбора в выборе точных операций; те, которые выбрал Эйнштейн, были определены удобством и простотой по отношению к световым лучам. Однако, совершенно независимо от точных количественных соотношений теории Эйнштейна, важным моментом для нас является то, что, если бы мы приняли операционную точку зрения, мы бы еще до открытия реальных физических фактов увидели, что одновременность, по сути, является относительным понятием, и оставили бы место в нашем мышлении для открытия таких эффектов, которые были обнаружены позже.

Подробное обсуждение концепции длины

Теперь мы можем глубже познакомиться с операционным отношением к концепции и некоторыми ее следствиями, рассмотрев с этой точки зрения концепцию длины. Наша задача - найти операции, с помощью которых мы измеряем длину любого конкретного физического объекта. Мы начинаем с объектов, с которыми мы чаще всего сталкиваемся, таких как дом или придомовой участок. На то, что мы делаем, в достаточной степени указывает следующее приблизительное описание. Мы начинаем с измерительного стержня, накладываем его на объект так, чтобы один из его концов совпадал с одним концом объекта, отмечаем на объекте положение другого конца стержня, затем перемещаем стержень по прямой линии, продолжая его предыдущее положение, пока первый конец не совпадет с предыдущим положением второго конца, повторяем этот процесс так часто, как только можем, и называем длину общим количеством раз, когда стержень применялся. Эта процедура, кажущаяся такой простой, на практике чрезвычайно сложна, и, несомненно, полное описание всех необходимых мер предосторожности заняло бы целый трактат. Мы должны, например, быть уверены, что температура стержня соответствует стандартной температуре, при которой определяется его длина, или же мы должны внести в нее поправку; или мы должны внести поправку на гравитационное искажение стержня, если мы измеряем вертикальную длину; или мы должны быть уверены, что стержень не является магнитом или не подвержен воздействию

электрических сил. Все эти меры предосторожности пришли бы в голову каждому физику. Но мы также должны пойти дальше и указать все детали, с помощью которых стержень перемещается из одного положения объекта в другое — его точный путь в пространстве и его скорость и ускорение при перемещении из одного положения в другое. На практике, конечно, подобные меры предосторожности не упоминаются, но наш опыт показывает, что вариации процедуры такого рода не влияют на конечный результат. Но мы всегда должны признавать, что весь наш опыт подвержен ошибкам и что когда-нибудь в будущем нам, возможно, придется более тщательно определять ускорение, например, стержня при перемещении из одного положения в другое, если точность эксперимента должна быть настолько увеличена, чтобы показать измеримый эффект. В *принципе* операции, с помощью которых измеряется длина, должны быть *однозначно* определены. Если у нас есть более одного набора операций, у нас есть более одной концепции, и, строго говоря, каждому отдельному набору операций должно соответствовать отдельное название.

Вот и все для длины неподвижного объекта, что достаточно сложно. Теперь предположим, что нам нужно измерить движущийся трамвай. Самая простая и то, что мы можем назвать "наивной" процедурой, заключается в том, чтобы сесть в автомобиль с помощью нашего счетчика и повторить операции, которые мы бы применили к неподвижному кузову. Обратите внимание, что эта процедура сводится к той, которая уже была принята в предельном случае, когда скорость трамвая обращается в нуль. Но здесь могут возникнуть новые вопросы детализации. Как нам запрыгнуть на машину с клюшкой в руке? Разбежимся и запрыгнем сзади или позволим ей подхватить нас спереди? Или, может быть, теперь материал, из которого сделана палочка, имеет значение, хотя раньше этого не было? На все эти вопросы нужно ответить экспериментальным путем. Основываясь на имеющихся доказательствах, мы полагаем, что не имеет значения, как мы запрыгиваем на машину или из какого материала сделан стержень, и что длина найденной таким образом машины будет такой же, как если бы она находилась в состоянии покоя. Но эксперименты сложнее, и мы не так уверены в наших выводах, как раньше. Теперь у только что приведенной процедуры есть очень очевидные ограничения. Если трамвай едет слишком быстро, мы не можем сесть в него напрямую, но должны использовать устройства, такие как выход из движущегося автомобиля; и, что еще более важно, существуют ограничения на скорость, которую можно придать трамваю или измерительным палочкам любыми практическими средствами, находящимися в нашем распоряжении, так что движущиеся тела, которые можно измерить таким образом, ограничены небольшим диапазоном скоростей. Если мы хотим иметь возможность измерять длину тел, движущихся с более высокими скоростями, таких, какие, как мы находим, существуют в природе (звезды или катодные частицы), мы должны принять другое определение и другие операции для измерения длины, которые также сводятся к операциям, уже принятым в статическом случае. Это именно то, что сделал Эйнштейн. Поскольку операции Эйнштейна отличались от наших операций, описанных выше, его "*длина*" не означает то же самое, что наша "*длина*". Соответственно, мы должны быть готовы обнаружить, что длина движущегося тела, измеренная с помощью процедуры Эйнштейна, отличается от приведенной выше; это, конечно, факт, и формулы преобразования теории относительности дают точную связь между двумя длинами.

Процедура Эйнштейна по измерению длины движущихся тел была продиктована не только соображением, что она должна быть применима к телам с высокими скоростями, но и математическим удобством, поскольку Эйнштейн описывает мир математически с помощью

системы координатной геометрии, а "длина" объекта связана просто с величинами в аналитических уравнениях.

Представляет интерес краткое описание реальных операций Эйнштейна по измерению длины движущегося тела; это покажет, как операции, которые могут быть простыми с математической точки зрения, могут показаться сложными с физической точки зрения. Наблюдатель, который должен измерить длину движущегося объекта, должен сначала распространить на всю свою плоскость отсчета (для простоты задача считается двумерной) систему временных координат, т.е. в каждой точке его плоскости отсчета должны быть часы, и все эти часы должны быть синхронизированы. На каждом часах должен находиться наблюдатель. Теперь, чтобы найти длину движущегося объекта в указанный момент времени (это предмет последующего исследования, чтобы выяснить, является ли его длина функцией времени), два наблюдателя, которые случайно совпадают по положению с двумя концами объекта в указанное время на своих часах, должны найти расстояние между своими двумя позициями с помощью процедуры измерения длины неподвижного объекта, и это расстояние по определению является длиной движущегося объекта в данной системе отсчета. Следовательно, эта процедура измерения длины движущегося тела включает в себя идею одновременности через одновременное положение двух концов стержня, и мы видели, что операции, с помощью которых определяется одновременность, являются относительными и изменяются при изменении движения системы. Следовательно, мы готовы обнаружить изменение длины тела при изменении скорости измерительной системы, и это фактически то, что происходит. Точная числовая зависимость разработана Эйнштейном и включает в себя другие соображения, которые нас в настоящее время не интересуют.

Два вида длины, наивная и эйнштейновская, имеют определенные общие черты. В любом случае в пределе, когда скорость измерительной системы приближается к нулю, операции приближаются к операциям измерения длины неподвижного объекта. Это, конечно, требование любого хорошего определения, налагаемое соображениями удобства, и это слишком очевидный вопрос, чтобы нуждаться в уточнении. Другая особенность заключается в том, что операции, эквивалентные любой концепции, обе связаны с движением системы, так что мы должны признать возможность того, что длина движущегося объекта может быть функцией его скорости. Это вопрос эксперимента, непредсказуемый до тех пор, пока не будет опробовано, что в пределах существующей экспериментальной ошибки движение не влияет на исходную длину, а длина Эйнштейна влияет.

До сих пор мы расширили концепцию длины только одним способом, выходящим за рамки обычного опыта, а именно до высоких скоростей. Очевидно, что расширение может быть произведено в других направлениях. Давайте спросим, с помощью каких операций мы измеряем длину очень большого объекта. На практике мы, вероятно, впервые сталкиваемся с желательностью изменения процедуры измерения больших участков земли. Здесь наша процедура зависит от измерений с помощью геодезического теодолита. Это включает в себя распространение по поверхности суши системы координат, начиная с базовой линии, измеренной обычным способом с помощью рулетки, наведение на удаленные точки от концов линии и измерение углов. Теперь в этом расширении мы внесли одно очень существенное изменение: углы между линиями, соединяющими удаленные точки, теперь являются углами между лучами света. Мы предполагаем, что луч света движется по прямой. Более того, распространяя нашу систему триангуляции на поверхность земли, мы предполагаем, что

геометрия световых лучей евклидова. Мы делаем все возможное, чтобы проверить предположения, но в лучшем случае можем получить лишь частичную проверку.

Таким образом, Гаусс[1] проверил, суммируются ли углы большого земного треугольника с двумя прямыми углами, и нашел соответствие в пределах экспериментальной ошибки. Теперь мы знаем из экспериментов Майкельсона[2], что если бы его измерения были достаточно точными, он не получил бы проверки, но имел бы избыток или дефект в зависимости от направления, в котором луч света проходил вокруг треугольника относительно вращения Земли. Но если геометрия световых лучей евклидова, то углы треугольника не только должны складываться в два прямых угла, но и существуют определенные соотношения между длинами сторон и углами, и для проверки этих соотношений стороны следует измерить по старой методике с помощью измерительной палочки. Такая проверка в больших масштабах никогда не предпринималась и неосуществима. Таким образом, кажется, что все наши проверки евклидова характера оптического пространства носят ограниченный характер. Мы, по-видимому, доказали, что до определенного масштаба величины оптическое пространство является евклидовым по отношению к мерам угла, но это не обязательно означает, что пространство также является евклидовым по отношению к мерам длины, так что пространство не обязательно должно быть полностью евклидовым. Существует еще одно важнейшее ограничение, заключающееся в том, что наши исследования неевклидовой геометрии показали, что *процентное* превышение углов неевклидова треугольника более 180° может зависеть от величины треугольника, так что вполне может быть, что мы не обнаружили неевклидов характер пространства просто потому, что наши измерения не проводились в достаточно большом масштабе.

[1]C. F. Gauss, *Gesammelte Werke*, особенно том IV.

[2]Смотрите обсуждение теории этого эксперимента Л. Зильберштейном, журнал *Opt. Soc. Amer.* 5, 291-307. 1921.

Таким образом, мы видим, что понятие длины претерпело очень существенное изменение характера даже в диапазоне земных измерений, поскольку мы заменили то, что я могу назвать тактильным понятием, оптическим понятием, осложненным предположением о природе нашей геометрии. От очень прямой концепции мы пришли к очень косвенной концепции с очень сложным набором операций. Строго говоря, длину, измеряемую таким образом с помощью световых лучей, следует называть по-другому, поскольку операции разные. Практическое обоснование сохранения того же названия заключается в том, что в наших нынешних экспериментальных пределах не было обнаружено численной разницы между результатами двух видов операций.

Нам еще хуже, когда мы расширяемся до солнечных и звездных расстояний. Здесь пространство носит полностью оптический характер, и у нас никогда не бывает возможности даже частично сравнить тактильное пространство с оптическим. Прямых мер длины никогда не производилось, и мы даже не можем измерить три угла треугольника и таким образом проверить наше предположение о том, что использование евклидовой геометрии для расширения концепции пространства оправдано. Мы никогда не имеем под наблюдением более двух углов треугольника, как при измерении расстояния до Луны путем наблюдения с двух

концов диаметра земли. Чтобы распространить наши меры длины на еще большее расстояние, мы должны сделать еще больше предположений, таких как то, что выводы из ньютоновских законов механики верны. Точность наших выводов о длинах на основе таких измерений невысока. Астрономия обычно рассматривается как наука с необычайно высокой точностью, но ее точность очень ограничена по своему характеру, а именно измерением углов. Вероятно, можно с уверенностью сказать, что ни одно астрономическое расстояние, за исключением, возможно, расстояния до Луны, не известно с точностью, превышающей 0,1%. Когда мы переносим наши оценки на расстояния за пределами солнечной системы, в которых нам помогают законы механики, мы в первую очередь ограничиваемся измерениями параллакса, которые в лучшем случае имеют довольно низкую точность и, кроме того, полностью выходят за пределы довольно ограниченного диапазона. Для больших звездных расстояний мы вынуждены прибегать к другим и гораздо более грубым оценкам, основанным, например, на распространении на большие расстояния связей, обнаруженных в диапазоне параллакса между яркостью и спектральным типом звезды, или на таких предположениях, как то, что, поскольку группа звезд выглядит так, как будто все они находятся вместе в космосе и имеют общее происхождение, это действительно так. Таким образом, на все больших и больших расстояниях не только снижается точность эксперимента, но и сама природа операций, с помощью которых должна определяться длина, становится неопределенной, так что расстояния до самых удаленных звездных объектов, оцененные разными наблюдателями или разными методами, могут сильно различаться. Конкретным следствием неточности астрономических мер больших расстояний является то, что вопрос о том, является ли крупномасштабное пространство евклидовым или нет, носит чисто академический характер.

Таким образом, мы видим, что при распространении с земных расстояний на большие звездные понятие длины полностью изменилось по своему характеру. Сказать, что определенная звезда находится на расстоянии 10^5 световых лет, на самом деле и концептуально совершенно отличается от того, что *вид* вещи от утверждения, что определенная стойка ворот находится на расстоянии 100 метров. Из-за нашей убежденности в том, что характер нашего опыта может измениться при изменении диапазона явлений, мы чувствуем важность такого вопроса, как то, является ли пространство расстояний в 10^5 световых лет евклидовым или нет, и соответственно недовольны тем, что в настоящее время, похоже, нет способа придать ему смысл.

Мы сталкиваемся с трудностями, подобными описанным выше, а также вынуждены изменять наши процедуры, когда отправляемся на небольшие расстояния. Вплоть до масштаба микроскопических размеров достаточно довольно простого расширения обычной процедуры измерения, например, когда мы измеряем длину в микрометровом окуляре микроскопа. Это, конечно, комбинация тактильных и оптических измерений, и относительно поведения световых лучей необходимо сделать определенные предположения, насколько это возможно, подтвержденные опытом. Эти предположения имеют совершенно иной характер, чем те, которые вызывают у нас беспокойство в астрономическом масштабе, потому что здесь мы сталкиваемся с трудностями, связанными с эффектами интерференции из-за конечного масштаба структуры света, и не связаны с возможной кривизной световых лучей в дальних областях космоса. Помимо соображений удобства, мы могли бы также измерять небольшие расстояния тактильным методом.

По мере уменьшения размеров все большее значение приобретают определенные трудности, которые в более крупном масштабе были незначительными. При физическом выполнении

операций, эквивалентных нашим концепциям, необходимо принять множество практических мер предосторожности, которые с трудом можно было бы четко перечислить, но о которых, тем не менее, знает любой физик-практик. Предположим, например, что мы измеряем длину тактильно с помощью комбинации датчиков Йоханссена. Складывая их вместе, мы должны быть уверены, что они чистые и, следовательно, находятся в фактическом контакте. Частицы механической грязи в первую очередь привлекают наше внимание. Затем, когда мы переходим к меньшим размерам, нам, возможно, придется обратить внимание на адсорбированные пленки влаги, затем, при еще меньших размерах, на адсорбированные пленки газа, пока, наконец, нам не придется работать в вакууме, который должен быть тем более полным, чем меньше размеры. Примерно в то время, когда мы обнаруживаем необходимость полного вакуума, мы обнаруживаем, что сами датчики имеют атомарную структуру, что у них нет определенных границ и, следовательно, нет определенной длины, но что длина является неопределенной величиной, быстро изменяющейся во времени между определенными пределами. Мы рассматриваем эту ситуацию как можно лучше, беря среднее значение по времени для видимых положений границ, предполагая, что наряду с уменьшением размеров мы приобрели соответствующее экстравагантное увеличение гибкости. Но по мере того, как размеры постоянно уменьшаются, трудности, связанные с этой туманностью, в процентном отношении увеличиваются бесконечно, и в конце концов мы вынуждены совсем сдаться. Мы сделали открытие, что существуют *существенные* физические ограничения на операции, которые определили понятие длины. [Возможно, мы не рассматриваем замену тактильного пространства оптическим в астрономическом масштабе как вызванную такого же рода физической необходимостью, потому что я полагаю, что возможная высадка людей на Луну всегда будет одной из мечтаний человечества.] В то самое время, когда мы подошли к концу нашей работы с нашей методикой измерения Йоханссена, наш компаньон с микроскопом столкнулся с трудностями из-за конечной длины световой волны; эту трудность он смог свести к минимуму, используя свет с постепенно сокращающимися длинами волн, но в конечном итоге ему пришлось остановиться на рентгеновских лучах. Конечно, эта оптическая процедура с помощью микроскопа более удобна и поэтому применяется на практике.

Давайте теперь посмотрим, что подразумевается под нашей концепцией длины, расширенной до ультрамикроскопических размеров. Что, например, означает утверждение о том, что расстояние между плоскостями атомов в определенном кристалле составляет 3×10^{-8} см.? Мы хотели бы иметь в виду, что $\frac{1}{3} \times 10^8$ этих плоскостей, наложенных друг на друга, дают толщину 1 см.; но, конечно, такое значение не соответствует действительности. Действительный смысл можно найти, изучив операции, с помощью которых мы пришли к числу 3×10^{-8} . Фактически, 3×10^{-8} было числом, полученным путем решения общего уравнения, выведенного из волновой теории света, в которое были подставлены определенные числовые данные, полученные в результате экспериментов с рентгеновскими лучами. Таким образом, характер понятия длины не только изменился с тактильного на оптический, но мы продвинулись гораздо дальше, посвятив себя определенной оптической теории. Если бы это была вся история, нам было бы крайне неудобно по отношению к этой области физики, потому что мы настолько неуверенны в правильности наших оптических теорий, но на самом деле можно применить ряд проверок, которые в значительной степени восстановят нашу уверенность. Например, исходя из плотности кристалла и пространства решетки, может быть вычислен вес отдельных атомов, и затем эти веса могут быть объединены с измерениями размеров других видов кристаллов, в которые входят те же атомы, для получения значений плотности этих кристаллов, которые могут

быть проверены экспериментально. Все такие проверки прошли успешно в пределах точности, которая довольно высока. Важно отметить, что, несмотря на проверки, характер концепции меняется и начинает включать такие вещи, как уравнения оптики и предположение о сохранении массы.

Однако мы не довольствуемся размерами атомного порядка, а должны перейти к электрону диаметром порядка 10^{-18} см. Каков возможный смысл утверждения о том, что диаметр электрона равен 10^{-18} см.? И снова единственный ответ можно найти, изучив операции, с помощью которых было получено число 10^{-18} . Это число получено в результате решения определенных уравнений, выведенных из полевых уравнений электродинамики, в которые были подставлены определенные числовые данные, полученные экспериментальным путем. Следовательно, концепция длины теперь была настолько модифицирована, чтобы включить теорию электричества, воплощенную в уравнениях поля, и, что наиболее важно, предполагает правильность распространения этих уравнений из измерений, в которых они могут быть проверены экспериментально, в область, в которой их правильность является одним из наиболее важных и проблематичных вопросов современной физики. Чтобы определить, верны ли уравнения поля в малом масштабе, мы должны проверить требуемые уравнениями соотношения между электрическими и магнитными силами и пространственными координатами, для определения которых требуется измерение длин. Но если этим пространственным координатам нельзя придать независимое значение, отличное от уравнений, то не только невозможна попытка проверки уравнений, но и сам вопрос теряет смысл. Если мы будем придерживаться концепции длины как таковой, мы попадем в порочный круг. Фактически, понятие длины исчезает как самостоятельная вещь и сложным образом сливается с другими понятиями, все из которых сами по себе изменяются таким образом, в результате чего общее количество понятий, используемых при описании природы на этом уровне, сокращается. Точный анализ ситуации труден, и я полагаю, что он никогда не предпринимался, но общий характер ситуации очевиден. До тех пор, пока не будет предпринята попытка хотя бы частичного анализа, я не вижу, какой смысл можно придавать таким вопросам, как то, является ли пространство евклидовым в малом масштабе.

Интересно отметить, что любое повышение точности в знании крупномасштабных явлений должно, насколько мы теперь можем видеть, проистекать из повышения точности измерения мелких вещей, то есть при измерении малых углов или анализе мельчайших различий длин волн в спектрах. Познание очень большого приводит нас в ту же область эксперимента, что и познание очень малого, так что в оперативном плане большое и малое имеют общие черты.

Этот несколько детальный анализ понятия длины выявляет черты, общие для всех наших концепций. Если мы имеем дело с явлениями за пределами области, в которой мы первоначально определили наши концепции, мы можем обнаружить физические препятствия для выполнения операций первоначального определения, так что исходные операции придется заменить другими. Эти новые операции, конечно, должны быть выбраны таким образом, чтобы они давали, в пределах экспериментальной погрешности, одинаковые численные результаты в области, в которой могут применяться оба набора операций; но мы должны признать в принципе, что, изменяя операции, мы действительно меняем концепцию, и что использование одного и того же названия для этих разных концепций во всем диапазоне продиктовано только соображениями удобства, которые иногда могут оказаться купленными слишком высокой ценой с точки зрения однозначности. Мы всегда должны быть готовы однажды обнаружить, что

повышение точности эксперимента может показать, что два разных набора операций, которые дают одинаковые результаты в более обычной части области опыта, приводят к ощутимо разным результатам в более незнакомых частях области. Мы должны продолжать осознавать эти стыки в нашей концептуальной структуре, если надеемся сделать ненужными услуги нерожденных Эйнштейнов.

Вторая особенность, общая для всех концепций, выявленная детальным обсуждением длины, заключается в том, что по мере приближения к экспериментально достижимому пределу концепции теряют свою индивидуальность, сливаются воедино и их становится все меньше, поскольку мы видели, что при размерах порядка диаметра электрона концепции длины и векторов электрического поля сливаются в аморфное целое. Природа, воспринимаемая нами, не только становится иной по своему характеру на своих горизонтах, но и упрощается, и поэтому наших концепций, которые являются строительными камнями наших описаний, становится все меньше. Это кажется совершенно естественным положением дел. То, как количество концепций часто остается формально неизменным по мере приближения к горизонту, будет обсуждаться позже, в особых случаях.

Точный анализ нашей концептуальной структуры никогда не предпринимался, за исключением, возможно, очень ограниченных областей, и мне кажется, что здесь есть место для гораздо более важной будущей работы. В данном эссе не предполагается проводить такой анализ, но следует указать лишь на некоторые из наиболее важных качественных аспектов. Никогда не будет возможно провести четкий логический анализ концептуальной ситуации, поскольку природа наших концепций, согласно нашей операционной точке зрения, такая же, как природа экспериментальных знаний, которые часто туманны. Таким образом, в переходных областях, где природа упрощается и изменяется количество операционально независимых концепций, определенная расплывчатость неизбежна, поскольку фактическое изменение нашей концептуальной структуры в этих переходных областях является непрерывным, что соответствует непрерывности наших экспериментальных знаний, тогда как формально количество концепций должно быть целым числом.

Относительный характер знания

Теперь необходимо рассмотреть два других следствия операциональной точки зрения. Первое - это то, что все наши знания относительны. Это можно понимать в общем или более частном смысле. Общий смысл проиллюстрирован в книге Холдейна *огосподстве теории относительности*. Теория относительности в общем смысле является простейшим трюизмом, если принято операциональное определение понятия, поскольку опыт описывается в терминах понятий, а поскольку наши понятия состоят из операций, все наши знания неизбежно должны быть относительными к выбранным операциям. Но знание также относительно в более узком смысле, например, когда мы говорим, что не существует такой вещи, как абсолютный покой (или движение) или абсолютный размер, но покой и размер - это относительные термины. Выводы такого рода связаны со специфическим характером операций, в терминах которых определяются остальные или размер. Изучение операций, с помощью которых мы определяем,

находится ли тело в состоянии покоя или в движении, показывает, что эти операции являются относительными: покой или движение определяются относительно какого-либо другого тела, выбранного в качестве стандарта. Говоря, что не существует такой вещи, как абсолютный покой или движение, мы не делаем утверждения о природе в том смысле, который можно было бы предположить, но мы просто делаем утверждение о характере наших описательных процессов. Аналогично в отношении размера: изучение операций процесса измерения показывает, что размер измеряется относительно основного измерительного стержня.

Таким образом, "абсолют" исчезает в первоначальном значении этого слова. Но "абсолют" может с пользой вернуться с измененным значением, и мы можем сказать, что вещь обладает абсолютными свойствами, если числовая величина одинакова при измерении с помощью одной и той же формальной процедуры всеми наблюдателями. Является ли данное свойство абсолютным или нет, может быть определено только экспериментально, что ставит нас в парадоксальное положение, согласно которому абсолют является абсолютным только относительно эксперимента. В некоторых случаях самое поверхностное наблюдение показывает, что свойство не является абсолютным, как, например, сразу становится очевидным, что измеренная скорость изменяется вместе с движением наблюдателя. Но в других случаях принять решение сложнее. Таким образом, Майкельсон думал, что у него есть абсолютная процедура для измерения длины, ссылаясь на длину волны линии красного кадмия как стандартную;^[3] потребовался сложный и точный эксперимент, чтобы показать, что эта длина меняется в зависимости от движения наблюдателя. Даже тогда, изменив определение длины движущегося объекта, мы полагаем, что эту длину можно было бы заставить вновь принять желаемый абсолютный характер.

^[3]А. А. Майкельсон, Световые волны и их использование, Издательство Чикагского университета, 1903, глава V.

Прекращение обсуждения на этом этапе может создать впечатление, что это наблюдение относительного характера знания представляет лишь очень слабый академический интерес, поскольку, по-видимому, оно касается в основном характера наших описательных процессов и мало что говорит о внешней природе. [Что это означает, мы оставляем решать метафизику.] Но я верю, что во всем этом есть более глубокое значение. Следует помнить, что все наши рассуждения начинаются с данных концепций. Теперь эти концепции включают физические операции; в открытии того, какие операции можно с пользой использовать для описания природы, похоронен почти весь физический опыт. Возводя нашу структуру физической науки, мы опираемся на труды всех эпох. Таким образом, в утверждении о том, что всякое движение относительно, есть это чисто физическое значение, а именно, что не было обнаружено никаких операций измерения движения, полезных для простого описания поведения природы, которые не являются операциями относительно отдельного наблюдателя; делая это утверждение, мы заявляем кое-что о природе. Требуется огромное количество реального физического опыта, чтобы обнаружить отношения такого рода. Открытие того, что число, полученное путем подсчета количества раз, когда палка может быть приложена к объекту, может быть просто использовано при описании природных явлений, было одним из самых важных и фундаментальных открытий, когда-либо сделанных человеком.

Бессмысленные вопросы

Другим следствием операционального характера наших концепций, почти следствием рассмотренного выше, является то, что вполне возможно, и даже пугающе легко, изобретать выражения или задавать вопросы, которые не имеют смысла. Осознание того, что огромное количество вопросов, которые мы некритично задаем, не имеют смысла, является большим достижением в нашем критическом отношении к природе. Если конкретный вопрос имеет смысл, должна быть возможность найти операции, с помощью которых на него можно дать ответ. Во многих случаях окажется, что операций не может быть, и вопрос, следовательно, не имеет смысла. Например, ничего не значит спрашивать, находится ли звезда в состоянии покоя или нет. Другим примером является вопрос, предложенный Клиффордом, а именно, возможно ли, что по мере перемещения солнечной системы из одной части космоса в другую абсолютный масштаб величины может меняться, но таким образом, чтобы влиять на все вещи одинаково, так что изменение масштаба никогда не может быть обнаружено. Изучение операций, с помощью которых измеряется длина в терминах измерительных стержней, показывает, что таких операций не существует (из-за характера нашего определения длины) для ответа на этот вопрос. Этому вопросу можно придать смысл только с точки зрения некоего воображаемого высшего существа, наблюдающего за происходящим со стороны. Но операции, с помощью которых такое существо измеряет длину, отличаются от операций нашего определения длины, так что вопрос приобретает смысл только при изменении значения наших терминов — в первоначальном смысле вопрос ничего не значит.

Утверждать, что определенный вопрос о природе бессмыслен, - значит делать важное утверждение о самой природе, потому что фундаментальные операции определяются природой, а утверждать, что природа не может быть описана в терминах определенных операций, - это важное утверждение.

Однако следует признать, что в некотором смысле ни один серьезный вопрос не является полностью бессмысленным, потому что, несомненно, спрашивающий имел в виду какое-то намерение, задавая этот вопрос. Но чтобы придать вопросу смысл в этом смысле, нужно исследовать значение понятий, используемых спрашивающим, и часто обнаруживается, что эти понятия могут быть определены только в терминах фиктивных свойств, подобно тому, как абсолютное время Ньютона определялось его свойствами, так что значение, которое таким образом приписывается вопросу, не имеет никакой связи с реальностью. Я считаю, что это позволит нам делать более значимые и интересные заявления и, следовательно, будет более полезным придерживаться исключительно оперативной точки зрения и, таким образом, допускать возможность совершенно бессмысленных вопросов.

Эта тема бессмысленных вопросов - очень тонкая вещь, которая может гораздо больше отравлять нашу мысль, чем та, которая имеет дело с чисто физическими явлениями. Я полагаю, что многие вопросы, задаваемые по социальным и философским предметам, окажутся бессмысленными, если рассматривать их с точки зрения операций. Несомненно, это в значительной степени способствовало бы ясности мышления, если бы операционный способ

мышления был принят во всех областях исследования, а также в физической сфере. Точно так же, как в физической области, так и в других областях человек делает важное заявление о своем предмете, заявляя, что определенный вопрос бессмыслен.

Чтобы подчеркнуть важность бессмысленных вопросов, я привожу здесь список вопросов, которыми читатель может развлечь себя, выясняя, имеют они смысл или нет.

- (1) Было ли когда-нибудь время, когда материи не существовало?
- (2) Может ли время иметь начало или конец?
- (3) Почему течет время?
- (4) Может ли пространство быть ограниченным?
- (5) Могут ли пространство или время быть прерывистыми?
- (6) Может ли пространство иметь четвертое измерение, не обнаруживаемое напрямую, но заданное косвенно путем умозаключения?
- (7) Существуют ли части природы, навсегда недоступные нашему наблюдению?
- (8) Действительно ли ощущение, которое я называю синим, *такое же*, как то, которое мой сосед называет синим? Возможно ли, что синий предмет может вызвать у него те же ощущения, что красный предмет вызывает у меня, и *наоборот*?
- (9) Могут ли отсутствовать целые числа в известном нам ряду натуральных чисел?
- (10) Возможна ли вселенная, в которой $2 + 2 \neq 4$?
- (11) Почему отрицательное электричество притягивает положительное?
- (12) Почему природа подчиняется законам?
- (13) Возможна ли вселенная, в которой действуют другие законы?
- (14) Если бы одну часть нашей вселенной можно было полностью изолировать от остальной, продолжала бы она подчиняться тем же законам?
- (15) Можем ли мы быть уверены, что наши логические процессы верны?

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ОПЕРАТИВНОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Принятие операциональной точки зрения предполагает гораздо большее, чем простое ограничение смысла, в котором мы понимаем "концепцию", но означает далеко идущие изменения во всех наших привычках мышления, поскольку мы больше не позволяем себе использовать в качестве инструментов нашего мышления концепции, которым мы не можем

дать адекватного отчета в терминах операций. В некоторых отношениях мышление становится проще, потому что некоторые старые обобщения и идеализации становятся непригодными для использования; например, многие рассуждения ранних натурфилософов становятся просто нечитаемыми. Однако в других отношениях размышлять становится намного сложнее, потому что операционные последствия концепции часто очень сложны. Например, наиболее трудно адекватно воспринять все, что содержится в кажущейся простой концепции "времени", и требует постоянной коррекции ментальных тенденций, которые мы уже давно безоговорочно принимаем.

Оперативное мышление поначалу окажется антиобщественной добродетелью; человек будет постоянно обнаруживать, что не в состоянии понять самый простой разговор своих друзей, и станет повсеместно непопулярным, требуя объяснения, казалось бы, самых простых терминов в каждом аргументе. Возможно, после того, как каждый приучит себя к этому лучшему способу, останется постоянная антиобщественная тенденция, потому что, несомненно, большая часть нашего нынешнего разговора тогда станет ненужной. Однако социально оптимистичный человек может рискнуть надеяться, что конечным результатом будет высвобождение своей энергии для более стимулирующего и интересного обмена идеями.

Не только оперативное мышление реформирует социальное искусство беседы, но и все наши социальные отношения будут подвержены реформе. Пусть любой изучит с практической точки зрения любое популярное в наши дни обсуждение религиозных или моральных вопросов, чтобы осознать масштабы ожидающей нас реформации. Везде, где мы тратим время или идем на компромисс в применении наших теорий поведения к практической жизни, мы можем заподозрить провал операционного мышления.

ГЛАВА II

ДРУГИЕ ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

ПРИБЛИЗИТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ЭМПИРИЧЕСКОГО ЗНАНИЯ

ХОТЯ многие аспекты процессов, с помощью которых мы получаем знания о внешнем физическом мире, выходят далеко за рамки нашего настоящего исследования, один вопрос необходимо упомянуть подробно, поскольку он молчаливо лежит в основе всего нашего обсуждения, а именно тот факт, что все результаты измерений являются лишь приблизительными. То, что это верно, очевидно после самого поверхностного изучения любого процесса измерения; любое утверждение о числовых соотношениях между измеряемыми величинами всегда должно быть оговорено тем, что это соотношение справедливо только в определенных пределах. Более того, кажется, что весь опыт носит такой характер; у нас никогда не бывает совершенно четких знаний о чем-либо, но весь наш опыт окружен сумеречной зоной,

полутенью неопределенности, в которую мы еще не проникли. Эта полутень - такая же поистине неизученная область, как и любая другая область, неподвластная эксперименту, например, область высоких скоростей, и мы не должны придерживаться предвзятых представлений о том, что будет найдено в этой области. Полутень должна быть преодолена за счет повышения точности измерений. В пределах того, что когда-то было полутенью, было обнаружено смещение углового положения звезд вблизи края солнечного диска, а в пределах еще непроницаемой полутени мы ищем такие эффекты, как эквивалентность массы и энергии. Многие из великих открытий будущего, вероятно, будут сделаны в полутени: мы уже упоминали, что расширение знаний о явлениях космического масштаба достигается за счет повышения точности измерения самых малых.

Общим следствием приблизительного характера всех измерений является то, что ни одна эмпирическая наука никогда не сможет сделать точных утверждений. Это было довольно очевидно в случае механики, но для этого потребовалась [4], чтобы убедить нас в том, что геометрия, в которой мы заинтересованы как физики, является эмпирическим предметом, и что нельзя сказать, что фактическое пространство является евклидовым, а только то, что фактическое пространство приближается к идеальному евклидову пространству в определенной степени приближения. Я полагаю, что мы вынуждены пойти еще дальше и признать, что арифметика, поскольку она претендует на то, чтобы иметь дело с реальными физическими объектами, также подвержена тому же налету неопределенности, что и все другие эмпирические науки. Типичным утверждением эмпирической арифметики является то, что 2 объекта плюс 2 объекта составляют 4 объекта. Это утверждение приобретает физический смысл только в терминах определенных физических операций, и эти операции должны выполняться вовремя.

[4] C. F. Gauss, *Gesammelte Werke*, особенно тома IV и VIII.

Теперь полутень попадает в эту ситуацию через понятие объекта. Если арифметическое утверждение должно быть точным утверждением в математическом смысле, то "объект" должен быть определенной четко очерченной вещью, которая сохраняет свою идентичность во времени без полутени. Но такого рода вещи никогда не переживаются и, насколько нам известно, не соответствуют в точности ничему из опыта. Конечно, верно, что в большинстве случаев полутень настолько тонкая и плотно прилегающая, что требуется особое усилие, чтобы вообще распознать ее присутствие; но тщательное изучение, я полагаю, показывает, что она присутствует всегда. Если бы наш опыт был ограничен явлениями в вакууме, а объекты, которые мы пытались сосчитать, были бы газовыми сферами, которые расширяются и проникают друг в друга, очевидно, что сформировать концепцию "объекта" как вещи, обладающей идентичностью, было бы гораздо труднее. Или, если наши объекты представляют собой стаканы с водой, мы обнаруживаем, когда наше наблюдение достигает определенной стадии уточнения, что количество воды постоянно меняется за счет испарения и конденсации, и нас беспокоит вопрос, остается ли объект тем же самым после того, как он набухает или убывает. Переходя к твердым телам, мы в конце концов обнаруживаем, что даже твердые тела испаряются или на них конденсируются газы, и мы видим, что объект с идентичностью - это абстракция, в точности не соответствующая ничему в природе. Конечно, полутень неопределенности, которая окружает наши арифметические утверждения из-за этого свойства

физических объектов, настолько чрезвычайно слаба, что практически мы не осознаем ее существования и ожидаем, что никогда не обнаружим неоткрытых явлений внутри полутени. Но в принципе мы должны признать его наличие и далее должны признать, что *вся* эмпирическая наука должна носить такой характер.

В большинстве эмпирических наук полутень сначала заметна, но становится менее важной и уточняется по мере повышения точности физических измерений. В механике, например, полутень сначала подобна плотной затемняющей вуали на стадии, когда мы измеряем силы только по нашим мышечным ощущениям, и постепенно ослабевает по мере повышения точности измерений. Но с арифметической концепцией индивидуального идентифицируемого объекта все обстоит с точностью до наоборот; грубая точка зрения вообще не подозревает о существовании полутени, и мы обнаруживаем ее только благодаря высокому совершенствованию наших методов. Несомненно, арифметика обязана своим ранним развитием этому свойству.

Теперь мы можем пойти еще дальше. Сами операции, конечно, выводятся из опыта и, как ожидается, также будут иметь туманный оттенок неопределенности. Мы должны задать такие вопросы, как, являются ли *операции* арифметики четкими вещами. Является ли операция умножения 2 объектов на 2 определенной операцией, без обволакивающей дымки? Весь наш физический опыт убеждает нас, что если в концепции операций такого рода и есть тень, то она настолько слаба, что ею можно пренебречь, по крайней мере в настоящее время; но этот вопрос дает интересную тему для размышлений. Мы также должны спросить, могут ли мыслительные операции подобным же образом быть окутаны дымкой.

ОБЪЯСНЕНИЯ И МЕХАНИЗМЫ

Возможно, кульминация нашей задачи интерпретации и соотнесения природы достигается тогда, когда мы способны найти объяснение явлениям; с нахождением объяснения мы склонны чувствовать, что наше понимание ситуации является полным. Теперь мы должны спросить, какова природа объяснения, которое мы ставим целью наших усилий. Ответ дать нелегко, и по этому поводу могут быть разные мнения. Мы получим наилучший ответ на этот, как и на многие другие вопросы, приняв оперативную точку зрения и проанализировав, что мы делаем, давая объяснение. Я полагаю, что исследование покажет, что суть объяснения состоит в сведении ситуации к элементам, с которыми мы настолько знакомы, что принимаем их как нечто само собой разумеющееся, чтобы удовлетворить наше любопытство.^[5] "Сведение ситуации к элементам" означает, с операционной точки зрения, обнаружение знакомых корреляций между явлениями, из которых состоит ситуация.

^[5] Конечные элементы объяснения аналогичны аксиомам формальной математики.

Здесь задействован тезис о том, что природу можно анализировать с точки зрения корреляций, не делая, однако, никаких предположений относительно характера этих корреляций. Мне кажется, что такой тезис является наиболее общим, который может быть выдвинут, если природа вообще должна быть понятной. Этот тезис лежит в основе всех соображений данного

эссе, и мы не будем пытаться найти что-либо более общее. Мы, однако, признаем, что любое предположение относительно характера корреляций представляет собой особую гипотезу, которая может ограничить будущее, и что поэтому эти особые гипотезы должны быть подвергнуты специальному исследованию. Мы вернемся к этому вопросу более подробно при обсуждении концепции причинности, которая тесно связана с концепцией объяснения.

При таком подходе к объяснению не подразумевается, что "элемент" представляет собой объект меньшего или большего масштаба, чем объясняемое явление; таким образом, мы можем объяснить свойства газа в терминах составляющих его молекул, или, возможно, когда-нибудь мы настолько познакомимся с идеей неевклидова пространства, что *объясним* (вместо описания) гравитационное притяжение камня землей в терминах искривления пространства-времени, создаваемого всей остальной материей во Вселенной.

Если это принять за истинную природу объяснения, мы увидим, что объяснение не является абсолютной вещью, но то, что удовлетворяет одного человека, не будет удовлетворительным для другого. Дикарь удовлетворяется тем, что объясняет грозу капризом разгневанного бога. Физик требует большего и требует, чтобы знакомые элементы, к которым мы сводим ситуацию, были такими, чтобы мы могли интуитивно предсказать их поведение. Таким образом, даже если бы физик верил в существование разгневанного бога, он не был бы удовлетворен таким объяснением грозы, потому что он не настолько хорошо знаком с разгневанными богами, чтобы быть в состоянии предсказать, когда за гневом последует буря. Он должен был бы знать, почему бог разгневался и почему вызванная гроза ослабила его гнев. Но даже с этой дополнительной оговоркой научное объяснение, очевидно, все еще остается делом относительным — по отношению к элементам или аксиомам, к которым мы сводим и которые принимаем как окончательные. Эти элементы в определенной степени зависят от поставленной цели, а также от диапазона нашего предыдущего физического опыта. Если мы объясняем действие машины, мы довольствуемся тем, что сводим действие к толчку и вытягиванию различных элементов машины, принимая как конечное условие, что эти элементы передают толчки или вытягивания. Но физик, который расширил свои экспериментальные знания дальше, возможно, захочет объяснить, как элементы передают толчки или притяжения в терминах воздействия друг на друга электронов на их орбитах в атомах. Характер нашей объяснительной структуры будет зависеть от характера наших экспериментальных знаний и будет меняться по мере их изменения.

Формально процессу объяснения нет предела, потому что мы всегда можем спросить, каково объяснение элементов, в терминах которых мы дали последнее объяснение. Но операциональная точка зрения показывает, что это простой формализм, который заканчивается лишь бессмысленным жаргонизмом, поскольку вскоре мы достигаем предела наших экспериментальных знаний, и за пределами этой операции, связанные с концепциями наших объяснений, становятся невозможными, а сами концепции теряют смысл.

По мере того, как мы расширяем экспериментальные знания и продвигаем наши объяснения все дальше и дальше, мы видим, что последовательность объяснений может быть прервана несколькими возможными способами. Во-первых, мы никогда не сможем продвинуть наши эксперименты дальше стадии, на которую не вступают элементы, с которыми мы уже знакомы. В данном случае объяснение очень простое: в нем нет ничего принципиально нового, а просто распутывание сложностей. Кинетическая теория газов, объясняющая тепловые свойства газа в

терминах обычных механических свойств молекул, предполагает такую ситуацию. Или, во-вторых, наши эксперименты могут привести нас в соприкосновение с новыми для нас ситуациями, в которых мы не можем распознать знакомых элементов или, по крайней мере, должны распознать, что есть что-то помимо знакомых элементов. Такая ситуация представляет собой кризис объяснения, и объяснение должно прекратиться по определению. Или, в-третьих, мы можем попытаться втиснуть наши объяснения в заранее определенную форму, формально устанавливая или изобретая за пределами диапазона предельных значений текущего эксперимента более или менее похожие элементы, уже знакомые нам, и пытаться объяснить весь нынешний опыт в терминах этих выбранных предельных значений.

Оставляя пока третью возможность, которую мы можем принять или отвергнуть и которая является формальным вопросом, остается просто вопросом экспериментального факта, какая из первых двух возможностей соответствует реальному положению дел. Самый поверхностный анализ современного состояния физики показывает, что сейчас мы сталкиваемся со второй из этих возможностей и что в новых экспериментальных фактах теории относительности и во всех квантовых явлениях мы сталкиваемся с кризисом объяснения. Часто подчеркивалось, что теория тяготения Эйнштейна вовсе не стремится дать объяснение гравитационным явлениям, а просто описывает и соотносит эти явления сравнительно простым математическим языком. Не предпринимается больше попыток свести гравитационное притяжение между землей и солнцем к простым терминам, чем это было сделано Ньютоном. В области квантовых явлений, конечно, самым обычным делом является то, что наши старые идеи механики и электродинамики потерпели неудачу, так что предметом величайшей озабоченности является определение того, сколько элементов из старых ситуаций могут быть перенесены в новые и вообще могут ли какие-либо элементы из старых ситуаций быть перенесены в новые.

Рассмотрение многих так называемых "объяснений" квантовой теории представляет собой одновременно обоснование приведенного выше определения объяснения и утверждения о том, что в квантовых явлениях мы находимся в объяснительном кризисе. Ибо цель всех этих квантовых объяснений состоит в том, чтобы найти в каждой новой или более сложной ситуации те же элементы, которые уже встречались в более простых ситуациях и которые, следовательно, относительно более знакомы. Например, многие квантовые явления связаны с выделением энергии, когда электрон перескакивает с одной орбиты на другую. Но всегда элементы, к которым сводятся, сами по себе являются квантовыми явлениями, и они все еще настолько новы и незнакомы, что мы чувствуем инстинктивную потребность в объяснении в других терминах. Мы стремимся понять, почему электрон излучает, когда он прыгает.

Объяснительный кризис, с которым мы сейчас сталкиваемся в теории относительности и квантовых явлениях, является всего лишь повторением того, что происходило много раз в прошлом. Похожий кризис постиг Прометей, когда он открыл огонь, и первого человека, который заметил соломинку, прилипшую к куску натертого янтаря, или подвешенный магнит, ищущий полярную звезду. Каждый котенок сталкивается с таким кризисом по истечении девяти дней. Всякий раз, когда опыт уводит нас в новые, незнакомые сферы, мы должны быть, по крайней мере, готовы к новому кризису.

Что же нам теперь делать в такой кризисной ситуации? Мне кажется, что единственный разумный путь - это делать в точности то, что делает котенок, а именно подождать, пока мы не накопим столько опыта нового вида, что он будет нам совершенно знаком, а затем возобновить

процесс объяснения с элементами нашего нового опыта, включенными в наш список аксиом. Наблюдения не только покажут, что именно это сейчас на самом деле делается в отношении квантовых и гравитационных явлений, но и согласуются со всем духом нашего взгляда на природу. Все наши знания основаны на опыте; мы не должны ожидать или желать возводить объяснительную структуру, отличную по характеру от структуры опыта. Наш опыт конечен; на границах экспериментально достижимого он становится туманным, а концепции, в терминах которых мы его описываем, сливаются воедино и теряют самостоятельное значение. Более того, при каждом расширении диапазона наших экспериментов мы должны быть готовы обнаружить, и на самом деле мы часто обнаруживали, что сталкиваемся с явлениями совершенно нового характера, к которым предыдущий опыт нас не подготовил. Предложенная выше объяснительная структура обладает всеми этими свойствами; она конечна, поскольку заканчивается на грани эксперимента, заключительные этапы наших объяснений туманны в том смысле, что становится все труднее различать элементы знакомого опыта, и время от времени мы должны допускать в наши объяснения новые элементы.

Первым шагом в возобновлении нашего объяснительного прогресса после того, как мы столкнулись с таким кризисом, является поиск различного рода корреляций между элементами нашего нового опыта в уверенном ожидании, что эти элементы в конечном итоге станут для нас настолько знакомыми, что их можно будет использовать в качестве конечной точки нового объяснения. Это именно то, что сейчас происходит в квантовой теории.

Диаметрально противоположный вышеприведенным взглядам, существует другой идеал объяснительного процесса, которого придерживаются многие физики и который был упомянут выше как третий возможный способ, которым последовательность объяснений может быть прервана, а именно, попытка разработать за пределами текущего эксперимента структуру, построенную из элементов, подобных некоторым из элементов нашего текущего опыта, в действии которых мы пытаемся найти объяснение явлений в настоящем диапазоне. Итак, подобная программа, как серьезная программа окончательного преобразования природы, полностью противоречит духу изложенных здесь соображений. Опыт не дает никаких оснований для уверенности в том, что по мере того, как мы проникаем все глубже и глубже, мы обнаруживаем повторение элементов предыдущего опыта, хотя иногда мы действительно обнаруживаем такие повторения, как, например, в поведении газов. Однако именно такой была позиция многих выдающихся физиков, например, Фарадея и Максвелла, стремившихся объяснить электрическое воздействие на расстоянии распространением в среде механического толчка или притяжения, или Герца, который искал во всех явлениях влияние скрытых масс, обладающих обычной механической инерцией. Хотя в качестве общего принципа эта программа кажется абсолютно необоснованной, тем не менее она может быть оправдана, если специфический характер физических фактов, по-видимому, указывает на повторение на более низких уровнях элементов, знакомых на более высоких. Герц, несомненно, имел это обоснование, как и Максвелл в определенной степени, открыв, что общие уравнения электродинамики имеют ту же форму, что и обобщенные уравнения Лагранжа механики. Для Фарадея, однако, похоже, такого оправдания нет; побуждение Фарадея к такого рода вещам проистекало из некритического принятия его собственных темпераментных реакций.

С менее серьезной точки зрения, однако, может быть вполне оправдано выдвинуть такую рабочую гипотезу, согласно которой в действии электрических сил могут быть обнаружены те же элементы, с которыми мы знакомы из повседневного опыта механиков. Ибо такая гипотеза

часто позволяет нам проводить частичные корреляции, которые предполагают новые экспериментальные проверки, и, таким образом, дает стимул к расширению нашего экспериментального горизонта. Многие физики признают предварительный характер таких попыток объяснения, но другие, очевидно, относятся к ним более серьезно, как, например, лорд Кельвин в его непрерывных попытках найти механическое объяснение всех физических явлений на протяжении всей его жизни. Эта цитата Кельвина проливает свет. "Я никогда не буду удовлетворен, пока не смогу создать механическую модель вещи. Если я смогу создать механическую модель, я смогу это понять. До тех пор, пока я не смогу полностью создать механическую модель, я не смогу ее понять.... Но я хочу понять свет как можно лучше, не вводя при этом вещей, в которых мы понимаем еще меньше".

Вот и все общие соображения о природе объяснения. Переходя теперь к более подробным объяснениям, многие объяснения включают то, что можно описать как механизм. Трудно точно охарактеризовать, что мы подразумеваем под механизмом, но, по-видимому, это связано с настроением ума, который стремится реализовать третью из упомянутых выше возможностей. Фактически, искомый механизм обычно относится к определенному типу, поскольку конечными выбранными элементами являются механические элементы. Эта точка зрения особенно характерна для английской школы физиков. Хотя "механизм" обычно подразумевает механические элементы, мы можем показать на конкретных примерах, что на самом деле используем это слово в более широком значении. Если бы, например, мы могли создать внутри ядра атома вращающуюся систему электрических зарядов, действующих друг на друга с помощью обычных электростатических сил, обратных квадрату, так что время от времени система становится нестабильной и распадается, мы, несомненно, сказали бы, что нашли механизм, объясняющий радиоактивный распад.

Однако формулировка точного определения механизма имеет для нас второстепенное значение; в первую очередь нас интересует понимание настроения ума, который считает механизм необходимым. Типичным примером такого стремления к механизму является гравитационное взаимодействие между удаленными телами. Для многих концепция действия на расстоянии абсолютно отвратительна, ее нельзя терпеть ни на мгновение. Такой невыносимой ситуации удастся избежать благодаря изобретению среды, заполняющей все пространство, которая передает силу от одного тела другому посредством последовательного воздействия друг на друга его смежных частей. Или дилеммы действия на расстоянии можно избежать другими способами, как у Босковича в восемнадцатом веке, который, чтобы объяснить гравитацию, заполнил пространство втрое бесконечной ордой бесконечно малых снарядов. Теперь, конечно, вопрос эксперимента заключается в том, можно ли приписать какую-либо физическую реальность среде, которая делает возможным притяжение за счет действия ее смежных частей, но я не вижу никакого оправдания для позиции, которая отказывается на чисто *априорных* основаниях принимать действие на расстоянии в качестве возможной аксиомы или конечного объяснения. Трудно представить себе что-либо более научно фанатичное, чем постулировать, что весь возможный опыт соответствует тому же типу, что и тот, с которым мы уже знакомы, и, следовательно, требовать, чтобы в объяснении использовались только элементы, знакомые по повседневному опыту. Такое отношение свидетельствует об отсутствии воображения, умственной тупости и упрямстве, которые, как можно было бы ожидать, исчерпали свое прагматическое оправдание на более низком уровне умственной деятельности.

Хотя, вероятно, будет довольно легко дать интеллектуальное согласие с критикой последнего абзаца, я полагаю, что многие обнаружат в себе стремление к механическому объяснению, обладающему всей цепкостью первородного греха. Обнаружение такого желания не должно вызывать особой тревоги, потому что легко увидеть, как потребность в такого рода объяснениях берет свое начало в огромном преобладании механического в нашем физическом опыте. Но, тем не менее, точно так же, как древние монахи боролись за подчинение плоти, так и физик должен бороться за подчинение этого иногда почти непреодолимого, но совершенно неоправданного желания. Одна из главных целей этого изложения будет достигнута, если оно будет нести в себе убеждение, что это стремление неоправданно и стоит того, чтобы приложить усилия, чтобы его подавить.

Ситуация, касающаяся действий на расстоянии, типична для общей ситуации. Я полагаю, что суть процесса объяснения такова, что мы должны быть готовы принять в качестве конечной точки для наших объяснений простое утверждение о корреляции между явлениями или ситуациями, с которыми мы достаточно знакомы. Таким образом, в квантовой теории нет причин, по которым мы не должны быть готовы принять в качестве окончательного фундаментального факта, что при скачке электрона испускается излучение, при условии, что мы всегда можем придать скачку электрона независимое значение с точки зрения операций. Если нет эксперимента, предполагающего другие и промежуточные явления, мы должны быть в состоянии быть интеллектуально удовлетворены этим. Конечно, совсем другое дело и совершенно оправданное - представить, что экспериментально повлечет за собой допущение более мелких деталей процесса, а затем искать эти возможные новые экспериментальные факты.

Следствием этой точки зрения является то, что любая корреляция адаптирована как абсолютно конечный элемент объяснения и никогда не может быть заменена открытием новых экспериментальных фактов, если корреляция *поопределению* находится за пределами досягаемости дальнейшего эксперимента. Такая возможность, например, содержится в корреляции между числовой величиной гравитационной постоянной и общей массой Вселенной. Что-то в этом роде вполне могут попытаться предпринять те, кто желает, чтобы их объяснения приняли формально окончательную форму. Мы вернемся к этому вопросу позже.

Инстинктивная потребность в механизме подкрепляется наблюдением за многими важными случаями, в которых были открыты или изобретены механизмы. Однако значение таких успешных попыток должно быть предметом самого тщательного изучения. Этот вопрос обсуждался Пуанкаре,^[6] который показал, что не только всегда возможно найти механистическое объяснение любого явления (программа Герца была вполне возможной), но и всегда существует бесконечное количество таких объяснений. Это очень неудовлетворительно.

^[6]Анри Пуанкаре. Виссеншафт и гипотеза, Переведенные на немецкий Ф. и Л. Линдеманными, Тойбнер, Лейпциг, 1906. Особенно см. стр. 217.

Мы хотим иметь возможность найти *реальный* механизм. Теперь изучение конкретных предлагаемых механизмов покажет, что большинство механизмов сложнее простого физического явления, для объяснения которого они изобретены, в том смысле, что они обладают большим количеством независимо изменяющихся атрибутов, чем то, что было

доказано до сих пор. Примером могут служить механические модели, изобретенные для облегчения изучения свойств простых индуктивных электрических цепей. Большое количество таких моделей, которые были предложены, является достаточным указанием на их возможное бесконечное количество. Но если механизм имеет больше независимо изменяющихся атрибутов, чем исходное явление, очевидно, что вопрос о том, является ли механизм реальным или нет, не имеет смысла, поскольку в механизме должны быть простые движения или комбинации движений, которые не имеют аналогов в чертах исходного явления, пока еще открытого. Таким образом, очевидно, что не существует операций, с помощью которых мы могли бы установить однозначное соответствие между свойствами механизма и природным явлением, и вопрос о реальности не имеет смысла. Таким образом, если мы хотим серьезно воспринимать механизм как действительно соответствующий реальности, мы должны требовать, чтобы у него было не больше степеней свободы, чем у исходного явления, и мы также должны быть уверены, что у этого явления нет неоткрытых особенностей. Физический опыт показывает, что выполнить такие условия труднее всего, и даже есть вероятность, что они невозможны.

Механизм с большим количеством независимо изменяющихся атрибутов, чем само явление, может оказаться очень полезным инструментом мышления, и поэтому его стоит изобрести и изучить, но к нему следует относиться не более серьезно, чем к мнемоническому устройству или любому другому изобретению, с помощью которого человек заставляет свой разум лучше служить ему.

Существует другая возможная программа объяснения, обратная рассмотренной выше, а именно объяснение всех знакомых фактов обычного опыта в терминах менее знакомых фактов, обнаруживаемых на более глубоком уровне. Наиболее ярким примером этого является недавняя попытка дать полное электрическое объяснение Вселенной. Первоначальная попытка заключалась в том, чтобы объяснить электрические эффекты в механических терминах; эта попытка провалилась. Примерно в то же время было экспериментально установлено существование электрона, так что стало очевидно, что электричество является очень фундаментальной составляющей материи. Программа объяснения была перевернута, и всем механическим явлениям, включая, в частности, механическую массу, требовалось электрическое объяснение. Но эта попытка также провалилась; мы признаем, что часть массы может иметь неэлектрический характер, мы постулируем неэлектрические силы внутри электрона, и, кроме того, мы обычно постулируем для электронов и протонов свойство непроницаемости, свойство, полученное из опыта на более высокой шкале величин.

Программа такого общего рода, вероятно, будет воспринята со значительной симпатией, и действительно, шансы на успех кажутся намного выше, чем у программы *converse*, поскольку по нашему опыту крупномасштабные явления чаще складываются из явлений малого масштаба и анализируются ими, чем обратные. Но в принципе мы должны снова признать, что единственный призыв - это эксперимент, и что мы должны задать только один вопрос: "Действительно ли верно, что все крупномасштабные явления могут быть построены из элементов мелкомасштабных явлений?" Мне кажется, что экспериментальное обоснование этого убеждения еще не приведено. Провал попытки электрического объяснения Вселенной является показательным примером. Однако неспособность доказать какое-либо утверждение не является гарантией того, что со временем оно может не быть доказано, и многие физики

убеждены в конечной осуществимости этой программы. Лично я считаю, что большое не всегда можно разделить на меньшее; эта тема будет обсуждаться снова.

Убежденность в значимости микроскопического анализа имеет много общего с обычной убежденностью в предельной простоте природы. Тезис о простоте включает в себя, кроме того, предположение о том, что количество видов мелкомасштабных элементов невелико, но на самом деле это не предполагает существенной разницы между двумя убеждениями, потому что мы видели, что элементов, из которых мы строим нашу структуру, становится все меньше по мере приближения к пределу экспериментально достижимого. Мы можем должным образом признать за убеждениями такого рода прагматическую ценность, предлагая новые корреляции и эксперименты, но признание эмпирической основы всей физики не позволит нам продвинуться дальше.

МОДЕЛИ И КОНСТРУКЦИИ

Обсуждая концепцию длины, мы не смогли найти смысла в таких вопросах, как: "Является ли пространство в масштабе 10^{-8} см. Евклидовым?" Тем не менее многим покажется, что они придают совершенно определенный смысл вопросу такого рода. Конечно, следует согласиться с тем, что величины в 10^{-8} см нельзя рассматривать в терминах непосредственного ощущения. Когда кто-то думает об атоме как о предмете, обладающем вообще какими-либо геометрическими свойствами, я полагаю, он обнаружит, что, по сути, он представляет себе модель, умножая все гипотетические размеры на коэффициент, достаточно большой, чтобы довести его до величины обычного опыта. Этой крупномасштабной модели приданы свойства, соответствующие свойствам физической вещи. Например, модель атома, которая была принята осенью 1925 года, содержит электроны, вращающиеся по орбитам, и время от времени электрон перепрыгивает с одной орбиты на другую, и одновременно от атома излучается энергия. Такая модель является удовлетворительной, если она предлагает аналог всех явлений исходного атома. Теперь я полагаю, что единственный смысл, который любой может найти в его утверждении о том, что пространство атома является евклидовым, заключается в том, что он верит, что может построить в евклидовом пространстве модель со всеми наблюдаемыми свойствами атома. Этой возможности может быть, а может и не быть достаточно, чтобы придать реальное физическое значение утверждению о том, что пространство атома евклидово. Ситуация здесь во многом такая же, как и в отношении механизмов. Модель может обладать гораздо большим количеством свойств, чем соответствует измеряемым свойствам атома, и, в частности, операции, с помощью которых пространство модели проверяется на предмет его евклидова характера, могут [и, на самом деле, я считаю, что *это* так и есть] не иметь аналогов в операциях, которые могут быть выполнены с атомом. Далее, мы не можем придавать никакого *реального* значения утверждению о том, что пространство атома является евклидовым, если не сможем показать, что ни одна модель, построенная в неевклидовом пространстве, не может воспроизвести измеримые свойства атома.

Несмотря на все это, я считаю, что модель является полезным и действительно незаменимым инструментом мышления, поскольку она позволяет нам думать о незнакомом в терминах

знакомого. Однако в его использовании есть опасности: функция критики заключается в раскрытии этих опасностей, чтобы инструмент можно было использовать с уверенностью.

С ментальной моделью тесно связаны ментальные конструкции, которыми полна физика. Существует много видов конструкций: те, которые нас интересуют, созданы нами для того, чтобы позволить нам иметь дело с физическими ситуациями, которые мы не можем непосредственно пережить с помощью наших органов чувств, но с которыми мы контактируем косвенно и путем умозаключений. Такие конструкции обычно в большей или меньшей степени включают элемент изобретения. Конструкция, содержащая очень мало изобретения, представляет собой конструкцию внутренней части непрозрачного твердого тела. Мы никогда не сможем непосредственно через наши органы чувств ощутить внутреннюю часть такого твердого тела, потому что в тот момент, когда мы непосредственно ощущаем его, оно по определению перестает быть внутренней частью. Здесь мы имеем конструкцию, но настолько естественную, что ее практически невозможно избежать. Примером конструкции, требующей большого количества изобретений, является напряжение в упругом теле. Напряжение - это по определению свойство внутренних точек тела, которое простым математическим способом связано с силами, действующими на свободной поверхности тела. Таким образом, стресс по самой своей природе навсегда остается недоступным непосредственному переживанию, и поэтому он является конструктом. Вся структура стресса ничему не соответствует в непосредственном опыте; он связан с силой, но сам по себе имеет шестикратную величину, тогда как сила - только трехкратную.

Далее мы должны спросить, является ли стресс, который мы изобрели для реагирования на ситуацию в организме, подверженном воздействию сил, хорошей конструкцией. Во-первых, напряжение имеет такое же количество степеней свободы, как и наблюдаемое явление, поскольку одним из положений математической теории упругости является то, что граничные условия, которые являются экспериментальными переменными, однозначно определяют напряжение в *данном* теле [*т.е.* теле с заданными постоянными упругости]; и, конечно, сразу становится очевидным при проверке уравнений, что, наоборот, возможная система напряжений однозначно определяет граничные условия в значительной степени. Таким образом, существует уникальное взаимно однозначное соответствие между стрессом и физической ситуацией, для удовлетворения которой он был создан, и до сих пор стресс является хорошей конструкцией. До этого момента напряжение, с точки зрения операций, в терминах которых оно определяется, является чисто математическим изобретением, которое оправдано, поскольку оно удобно для описания поведения тел, подвергающихся силовому воздействию. Но теперь мы хотим пойти дальше и приписать напряжению физическую реальность, подразумевая под этим, что напряжение в твердом теле должно соответствовать некоторому реальному физическому состоянию внутренних точек. Давайте рассмотрим, с точки зрения операций, каково может быть значение подобного утверждения. Поскольку теперь мы хотим приписать ударению дополнительный физический смысл, выходящий за рамки математических операций, в терминах которых это ударение было определено, должны существовать дополнительные физические операции, соответствующие этому значению, иначе наше утверждение бессмысленно. Теперь, конечно, вопрос самого элементарного опыта заключается в том, что физические явления действительно существуют, которые допускают эти другие независимые операции. Тело, находящееся под напряжением, также находится в состоянии деформации, которое может быть определено по внешним деформациям, или деформация во внутренних точках может быть сделана более ярко реальной благодаря тем

оптическим эффектам двойного преломления в прозрачных телах, которые сейчас так широко используются в модельных экспериментах, или если напряжение выходит за пределы определенной точки, мы имеем такие новые явления, как постоянное затвердевание или, наконец, разрыв.

Таким образом, у нас есть все основания быть довольными нашей конструкцией стресса. Во-первых, с формальной точки зрения, это хорошая конструкция, потому что между ней и физическими данными, в терминах которых она определяется, существует уникальное соответствие; и, во-вторых, мы имеем право приписывать ей физическую реальность, потому что она однозначно связана с другими физическими явлениями, *независимыми от тех, которые вошли в ее определение*. Это последнее требование, фактически, с операциональной точки зрения, представляет собой не что иное, как определение того, что мы подразумеваем под реальностью вещей, не данных непосредственно опытом. Поскольку теперь, помимо удовлетворения формальных требований, опыт показывает, что ударение наиболее полезно при корреляции явлений, мы вправе отвести этой конструкции ударения видное место среди наших концепций.

Рассмотрим теперь другую конструкцию, одну из важнейших в физике, - конструкцию электрического поля. Во-первых, изучение операций, с помощью которых мы определяем электрическое поле в любой точке, покажет, что это конструкция, поскольку она не является прямым данным опыта. Чтобы определить электрическое поле в точке, мы помещаем в эту точку исследующий заряд, измеряем действующую на него силу, а затем вычисляем отношение силы к заряду. Затем мы позволяем исследуемому заряду становиться все меньше и меньше, повторяя наше измерение силы для каждого меньшего заряда, и определяем предел отношения силы к заряду как напряженность электрического поля в рассматриваемой точке, а предельное направление силы на небольшой заряд как направление поля. Мы можем распространить этот процесс на каждую точку пространства и таким образом получить концепцию силового поля, с помощью которого каждая точка пространства, окружающая электрические заряды, помечается соответствующим номером и направлением, при этом исследующий заряд полностью исчезает. Таким образом, поле, очевидно, является конструкцией. Далее, с формальной точки зрения математики, это хорошая конструкция, потому что существует взаимно однозначное соответствие между электрическим полем и электрическими зарядами, в терминах которых оно определяется, причем поле однозначно определяется зарядами, и наоборот, существует только один возможный набор зарядов, соответствующий данному полю. Теперь почти каждый физик делает следующий шаг и приписывает электрическому полю физическую реальность, поскольку он думает, что в каждой точке поля происходит какое-то реальное физическое явление, которое еще точно не определено и связано с номером и направлением, обозначающими точку. Сначала эта точка зрения самым естественным образом предполагала в качестве следствия существование медиума, но в последнее время вошло в моду говорить, что медиума не существует и что реально только поле. Реальность этой области сознательно прививается в нашем начальном обучении, часто со значительными трудностями для ученика. Эта точка зрения обычно приписывается Фарадею и считается наиболее фундаментальной концепцией всей современной электрической теории. И все же, несмотря на это, я полагаю, что критический анализ покажет, что приписывание физической реальности электрическому полю совершенно необоснованно. Я не могу найти ни одного физического явления или ни одной физической операции, с помощью которых можно было бы получить доказательства существования поля

независимо от операций, вошедших в определение. Единственное физическое доказательство, которое у нас когда-либо было о существовании поля, получено путем обращения туда с электрическим зарядом и наблюдения за действием на заряд [когда заряды находятся внутри атомов, мы можем наблюдать оптические явления], что в точности соответствует определению. Тогда либо бессмысленно говорить, что поле обладает физической реальностью, либо мы виновны в принятии определения реальности, которое является грубейшей тавтологией.

Не может быть никаких сомнений в огромной важности концепции электрического поля как инструмента для осмысления, описания, корреляции и прогнозирования свойств электрических систем; наука об электричестве немыслима без этого или чего-то эквивалентного. Но в дополнение к этому аспекту концепции поля почти всегда присутствует дальнейший неявный подтекст физической реальности, который оказал наибольшее влияние на характер физической мысли и эксперимента. И все же я не верю, что дополнительный подтекст физической реальности оправдал себя, выявив единственный положительный результат, или может предложить что-то большее, чем прагматичная ссылка на то, что он стимулировал большое количество экспериментов, все с неизменно отрицательными результатами. Достаточно упомянуть судьбу попытки Фарадея и Максвелла приписать эфиру напряжение, подобное напряжению обычной материи, которая потерпела неудачу, потому что, среди прочих причин, в эфире не может существовать ничего аналогичного *напряжению* обычной материи, чтобы указать на бесплодность идеи физической реальности. Мне кажется, что любое прагматическое обоснование постулирования реальности электрического поля теперь исчерпано, и что мы достигли стадии, когда мы должны попытаться приблизиться к реальным фактам, избавив концепцию поля от последствий реальности.

Другой незаменимой и наиболее интересной конструкцией является конструкция атома. Очевидно, что это конструкция, потому что никто никогда не испытывал атом непосредственно, и его существование полностью логично. Атом был изобретен для объяснения постоянных комбинированных весов в химии. Долгое время не было других экспериментальных доказательств его существования, и он оставался чистым вымыслом, без физической реальности, полезным при обсуждении определенной группы явлений. Это одна из самых увлекательных вещей в физике - отслеживать накопление независимой новой физической информации, указывающей на атом, до сих пор мы так же убеждены в его физической реальности, как в наших руках и ногах.

Конструкция, от которой пришлось отказаться, поскольку оказалось, что она не обладает физической реальностью, и которая, кроме того, оказалась недостаточно полезной в свете недавно открытых явлений, заключалась в теплоносителе.

Понятие "физическая реальность" не имеет первостепенного значения для данного обсуждения характера наших конструкций; наше определение значения физической реальности может понравиться не всем. Существенным моментом является то, что наши конструкции делятся на два класса: те, которым не соответствуют никакие физические операции, кроме тех, которые входят в определение конструкции, и те, которые допускают другие операции или которые могут быть определены несколькими альтернативными способами в терминах физически различных операций. Можно ожидать, что это различие в характере конструкций соответствует существенным физическим различиям, и эти физические различия слишком вероятны, чтобы быть упущенными из виду в мышлении физиков. Мы всегда должны быть настороже, чтобы не

забывать о физических различиях между такими вещами, как напряжение в упругом теле, и электромагнитным полем.

Мораль всего этого заключается в том, что конструкции являются наиболее полезными и даже неизбежными вещами, но что они могут таить в себе большие опасности, и что может потребоваться тщательная критика, чтобы избежать прочтения в них последствий, для которых нет подтверждения опытом, и которые могут самым глубоким образом повлиять на наш физический взгляд и образ действий.

РОЛЬ МАТЕМАТИКИ В ФИЗИКЕ

Практически все формулировки теоретической физики сформулированы в математических терминах; фактически, получение таких формулировок обычно считается целью теоретической физики. Тогда, очевидно, уместно рассмотреть, какова природа математики, которой мы отводим столь заметную роль.

Прежде всего, мы должны понять, почему вообще возможно выразить физические соотношения на математическом языке. Я не уверен, что в этом вопросе есть большой смысл. Это сущий трюизм, очевидный сразу же для неискушенного наблюдателя, что математика - это изобретение человека. Более того, математика, которой интересуется физик, была разработана с явной целью описания поведения внешнего мира, так что, безусловно, не случайно, что существует соответствие между математикой и природой. Однако соответствие ни в коем случае не является совершенным, но в математике всегда есть точное качество, которого никогда не достигает ни одна из наших сведений о природе. Теоремы геометрии Евклида иллюстрируют это в исключительной степени. Утверждение о том, что между двумя точками есть только одна прямая и что это кратчайший возможный путь между точками, полностью отличается по своему характеру от любой информации, когда-либо предоставляемой физическими измерениями, поскольку все наши измерения подвержены ошибкам. Тем не менее, можно придать определенный реальный физический смысл идеально точным утверждениям геометрии, потому что результатом повседневного опыта является то, что по мере повышения точности наших физических измерений количественные утверждения геометрии проверяются с постоянно уменьшающимся пределом погрешности. Из этого вытекает тот взгляд на природу математики, которого, по-видимому, придерживаются чаще всего; а именно, что если бы мы могли устранить несовершенства наших измерений, математические соотношения были бы точно проверены. Предполагается, что абстрактные математические принципы действуют в природе, управляя природными явлениями, как давным-давно пытался выразить Пифагор своей гармонией сфер и мистическими отношениями чисел.

Этот идеализированный взгляд на связь математики с природой мог сохраняться только в тот исторический период, когда точность физических измерений была низкой, и теперь от него следует отказаться. Ибо уже не верно, что точные соотношения геометрии Евклида могут быть бесконечно приближены путем увеличения точности процесса измерения, но существуют существенные физические ограничения на сами понятия длины и т.д., которые входят в

геометрические формулировки, задаваемые дискретной структурой материи и излучения. Это не академический вопрос, но затрагивает суть ситуации. Больше нет никаких оснований для идеализации математики и для мнения, что наше несовершенное знание природы ответственно за неспособность найти в природе точные математические соотношения. Несовершенна созданная нами математика, а не наши знания о природе. [С операционной точки зрения бессмысленно пытаться отделить "природу" от "знания о природе".] Математические концепции - это изобретения, сделанные нами в попытке описать природу. Теперь мы неоднократно будем видеть, что изобретать концепции, которые в точности соответствуют тому, что мы знаем о природе, - самая трудная вещь в мире, и мы, по-видимому, никогда не достигаем успеха. Математика не исключение; здесь мы, несомненно, ближе к идеалу, чем где-либо еще, но мы видели, что даже арифметика не полностью воспроизводит физическую ситуацию.

Математика, по-видимому, не соответствует в точности физической ситуации по крайней мере в двух отношениях. Во-первых, существует проблема ошибок измерений в пределах обычного опыта. Теперь математика может справиться с этой ситуацией, хотя и несколько неуклюже, и лишь приблизительно, специально дополняя свои уравнения утверждениями о пределе ошибки или заменяя уравнения неравенствами — короче говоря, то, что делается при каждом обсуждении распространения ошибки измерения. Во-вторых, и это гораздо важнее, математика не признает, что по мере увеличения физического диапазона фундаментальные понятия становятся расплывчатыми и в конечном итоге полностью теряют физический смысл, и поэтому должны быть заменены другими понятиями, которые операционально совершенно отличаются. Например, уравнения движения не делают различия между движением звезды в нашу галактику из внешнего пространства и движением электрона вокруг ядра, хотя физически значение величин в уравнениях в терминах операций в этих двух случаях совершенно различно. Структура нашей математики такова, что мы почти вынуждены, хотим мы того или нет, говорить о внутренней части электрона, хотя физически мы не можем придать какой-либо смысл таким утверждениям. В нынешнем виде математика напоминает словоохотливого и не всегда связного оратора, о котором говорили, что он способен открыть рот, уйти и оставить его. Чего мы хотели бы, так это некоторого развития математики, с помощью которого можно было бы сделать так, чтобы уравнения перестали иметь значение за пределами диапазона числовых величин, в котором сами физические концепции имеют значение. Другими словами, проблема состоит в том, чтобы наши уравнения более точно соответствовали лежащему в их основе физическому опыту; очевидно, для достижения этой цели требуется какое-то новое изобретение.

Позже, при обсуждении уравнений электродинамики Лоренца, мы вернемся к недостаткам, возникающим из-за нынешнего неразборчивого характера математики. В то же время мы должны признать, что здесь есть как очень важные преимущества, так и недостатки. Весь опыт оправдывает ожидание того, что законы природы, с которыми мы уже знакомы, действуют по крайней мере приблизительно и без резких изменений в неисследованных областях, непосредственно за пределами нашей нынешней досягаемости. Предполагая неограниченную действительность законов в том виде, в каком мы их сейчас знаем, математика позволяет нам проникать в сумеречную зону и делать прогнозы, которые позже могут быть проверены. Только когда мы заходим слишком далеко, мы должны отказаться от этой характеристики нашей математики.

Существует еще один аспект использования математики при описании природы, который часто упускается из виду; а именно, что любая система уравнений может содержать лишь очень малую часть реальной физической ситуации; за уравнениями стоит огромный описательный фон, благодаря которому уравнения устанавливают связь с природой. Эта справочная информация включает в себя описание всех физических операций, с помощью которых получаются данные, входящие в уравнения. Например, когда Эйнштейн формулирует поведение вселенной в терминах мировых линий событий, события в том виде, в каком они входят в уравнения, являются совершенно бесцветными вещами, просто 3-мя пространственными и 1-мя временными координатами. Чтобы установить связь с опытом, должен быть описательный фон, дающий физическое содержание событий; например, может быть утверждение, что некоторые из событий являются световыми сигналами. Предполагается, что этот описательный фон остается неизменным, на него не влияют никакие операции, которым подвергаются сами уравнения. Если, например, система отсчета уравнений изменяется из-за изменения ее скорости, предполагается, что физическое значение описательного фона остается неизменным, или, скорее, этот вопрос обычно вообще не упоминается. Однако, казалось бы, этот вопрос требует некоторого обсуждения. Описательный фон приобретает свое значение только в терминах определенных физических операций. Если описательный фон остается неизменным, например, при изменении равномерной скорости системы отсчета, это означает, что движение системы отсчета никоим образом не влияет на возможность выполнения определенных операций. Это довольно близко к самому ограниченному принципу относительности, который гласит, что равномерная скорость не влияет на форму законов природы. Таким образом, до тех пор, пока не будет проведен более тщательный анализ ситуации, может показаться, что есть некоторые основания для подозрения, что принцип относительности связан с возможностью придания физическим явлениям *полной* математической формулировки, понимая под "полным" значение "включая описательный фон".

ГЛАВА III

ПОДРОБНОЕ РАССМОТРЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ

Теперь мы приступаем к детальному рассмотрению наиболее важных концепций физики. Попытка сделать что-то большее, чем просто указать на некоторые из наиболее важных вопросов, полностью выходит за рамки данного эссе. Также не следует ожидать, что части этого обсуждения всегда будут иметь очень тесную связь друг с другом; цель обсуждения - помочь в приобретении максимально возможного самосознания всей структуры физики.

КОНЦЕПЦИЯ ПРОСТРАНСТВА

Логически удовлетворяющее определение того, что мы понимаем под понятием пространства, несомненно, дать трудно, но мы будем недалеко от истины, если будем думать о нем как о совокупности всех тех понятий, которые имеют отношение к положению. Положение означает положение чего-либо. Положение вещей определяется некоторой системой измерений; возможно, самой простой является та, которая подразумевается в декартовой системе координат с ее тремя измерениями длины. Следовательно, большая часть существенного обсуждения пространства уже была дана в связи с концепцией длины. Мы видели, что измерения длины производятся с помощью физических измерительных стержней, приложенных к некоторому физическому объекту. Мы не можем измерить расстояние между двумя точками в пустом пространстве, потому что, если бы пространство было пустым, не было бы ничего, что могло бы определить положение концов измерительного стержня, когда мы перемещаем его из одного положения в другое. Таким образом, с точки зрения операций мы видим, что структура декартовой геометрии, часто представляемая в идеальном математическом смысле, на самом деле является физической структурой, и то, что мы подразумеваем под пространственными свойствами, есть не что иное, как свойства этой структуры. Когда мы говорим, что пространство евклидово, мы имеем в виду, что физическое пространство метровых палочек евклидово: бессмысленно спрашивать, является ли евклидовым пустое пространство. Следовательно, геометрия в той мере, в какой ожидается, что ее результаты применимы к внешнему физическому миру, и в той мере, в какой она не является логической системой, построенной на постулатах, является экспериментальной наукой. Эта точка зрения сейчас хорошо понята и принята, но было время, когда ее не принимали, а энергично критиковали; изменение отношения к этому вопросу является симптомом изменения отношения ко многим другим подобным вопросам.

Мы уже подчеркивали, что пространство астрономии - это не физическое пространство метровых палочек, а пространство световых волн. Следовательно, у нас могут быть разные виды пространства, в зависимости от фундаментальных операций. Пространство метровых палочек мы называли "тактильным пространством", а пространство световых лучей - "оптическим пространством". Если мы спрашиваем, является ли астрономическое пространство евклидовым, мы имеем в виду просто спросить, являются ли евклидовыми те особенности оптического пространства, которые находятся в пределах досягаемости астрономических измерений. Единственно возможная позиция по отношению к этому вопросу или таким связанным с ним вопросам, как конечен ли общий объем пространства или имеет ли пространство кривизну, заключается в том, что это полностью зависит от эксперимента, и что мы не имеем права формировать какое-либо предвзятое представление вообще. Поэтому это выходит за рамки данного обсуждения.

Интересно отметить, что ограниченная теория относительности фактически предполагает, хотя часто и не делает явного заявления, что тактильное и оптическое пространство - это одно и то же. Эта эквивалентность вытекает из свойств, предполагаемых для световых лучей. Расстояние до зеркала можно с таким же успехом определить, измерив его с помощью измерительных палочек или определив время, необходимое световому сигналу для прохождения туда и обратно. Однако такая ситуация логически неудовлетворительна, поскольку следует предположить, что операции измерения времени определены независимо, а мы увидим, что это не так. Следствием предполагаемой эквивалентности тактильного и оптического пространства является то, что путь луча света представляет собой прямую линию, поскольку прямая линия определяется операциями с метровыми палочками. Когда мы переходим к астрономическим

явлениям, физические операции с измерительными палочками больше не могут выполняться, и бессмысленно приписывать лучам света в астрономическом масштабе те же геометрические свойства, которые мы делаем в малом масштабе.

ПОНЯТИЕ ВРЕМЕНИ

Согласно нашей точке зрения, понятие времени определяется операциями, с помощью которых оно измеряется. Мы должны различать два вида времени: время событий, происходящих рядом друг с другом в пространстве, или локальное время, и время событий, происходящих в значительно удаленных друг от друга точках пространства, или расширенное время. Как мы теперь знаем, концепция протяженного времени неразрывно связана с концепцией пространства. Это в первую очередь вовсе не утверждение о природе, и оно могло быть сделано просто на основании наблюдения, что операции, с помощью которых измеряется протяженное время, связаны с операциями измерения пространства. Конечно, исторически доктрина относительности была ответственна за критическое отношение, которое привело к изучению операций измерения времени, но теория относительности не была необходима для осознания пространственных последствий времени, так же как открытие планковской квантовой единицы h было необходимо для изобретения Планком своих абсолютных единиц измерения, хотя исторически на это изобретение его вдохновило открытие h , и, по-видимому, он сам считал эту связь необходимой.^[7]

^[7]Макс Планк, Теория теплового излучения, перевод Масиуса, Сына П. Блейкстона и Компании, издание 1914 года, стр. 174.

Физические операции, лежащие в основе измерения времени, никогда не подвергались критическому анализу, который, по-видимому, требуется. Один из методов измерения, например, связан со свойствами света.

На двух концах установлена измерительная палочка с зеркалами, и луч света перемещается взад и вперед между двумя зеркалами без поглощения. Время, необходимое для одного перехода туда и обратно, определяется как единица измерения времени, и время измеряется простым подсчетом этих интервалов. Но такая процедура неудовлетворительна, если мы хотим позволить себе все те операции, которых требует даже простейший постулат теории относительности, поскольку мы должны быть способны перемещать наши часы с места на место, переводить их из одной системы в другую в относительном движении и с их помощью определять свойства световых лучей в неподвижной или движущейся системе. Мы в принципе признаем, что длина измерительной палочки может отличаться, когда она находится в движении, что она также может изменяться при ускорении, возникающем при перемещении ее из одного места в другое, и что, пока не доказано обратное, скорость света может быть функцией скорости или ускорения. Сложное взаимодействие всех этих возможностей оставляет у нас большие сомнения относительно физического значения таких постулатов, как, например, то, что скорость света одинакова в движущейся и неподвижной системах. Чтобы приписать

какое-либо простое значение постулатам о скорости света, казалось бы, у нас должен быть инструмент для измерения этой скорости и, следовательно, для измерения времени, которое само по себе не связано со свойствами света. Чтобы сделать это, мы могли бы попытаться определить измерение времени в чисто механических терминах, как, например, в терминах вибрации камертона или вращения маховика. Но здесь мы снова сталкиваемся с большими трудностями, потому что понимаем, что размеры наших механических часов могут изменяться при приведении их в движение, и что масса их частей также может изменяться. Мы хотим использовать часы как физический инструмент для определения законов механики, которые, конечно, не будут определены до тех пор, пока мы не научимся измерять время и не обнаружим, что законы механики влияют на работу часов.

Дилемма, с которой мы сталкиваемся здесь, не является неразрешимой и фактически имеет ту же природу, что и та, с которой столкнулся первый физик, которому пришлось открывать одновременно приблизительные законы механики и геометрии с натянутой струной, когда он за нее потянул. Сначала мы должны приблизительно угадать, каковы законы, затем спроектировать эксперимент так, чтобы в соответствии с этим предположением влияние движения на какое-либо явление было намного больше, чем ожидаемое влияние на часы, затем на основе измерений с неисправленным временем часов найти приблизительное выражение для влияния движения на массу или длину, с помощью которого мы корректируем часы, и так далее до бесконечности. Однако, насколько я знаю, возможность такой процедуры не анализировалась, и до тех пор, пока анализ не будет дан, наше самодовольство будет нарушено настоящим беспокойством, интенсивность которого зависит от естественного скептицизма нашего темперамента.

На практике трудности такой логической трактовки настолько велики, что этот вопрос был полностью замалчиваем. Удобно постулировать часы неизвестной конструкции, но такие, что скорость света, измеряемая в их терминах, обладает определенными свойствами. Такова, например, точка зрения в недавней книге Биркгоффа.^[8]

^[8]Г. Д. Биркгофф. Теория относительности и современная физика, Издательство Гарвардского университета, 1923.

Сложность этого метода заключается в том, что результирующее здание так же оторвано от физической реальности, как и логическая геометрия постулатов. Мы вовсе не можем быть уверены, что свойства света, измеренные с помощью наших физических часов, совпадают с теоретическими свойствами. Трудность особенно важна и фундаментальна в общей теории относительности; основой всей теории является бесконечно малый интервал ds , который предполагается задать. После того, как задано, математика следует за этим. Но в физическом мире ds не задан, а должен быть найден с помощью физических операций, и эти операции включают измерения длины и времени с помощью часов, конструкция которых не указана. В любом реальном физическом приложении необходимо ответить на вопрос, действительно ли физический инструмент, используемый для измерения временной части ds , является часами или нет. В настоящее время нет критерия, по которому можно было бы ответить на этот вопрос. Если вибрирующий атом - это часы, то солнечный свет смещен в инфракрасную область, но откуда мы знаем, что атом - это часы (одни говорят "да", другие "нет")? Если мы обнаружим смещение физически, доказали ли мы тем самым, что общая теория относительности физически верна, или мы доказали, что атом - это часы, или мы просто доказали, что

существует особый вид связи между атомом и остальной природой, оставляя открытой возможность того, что ни атом не является часами, ни общая теория относительности верны? На практике, конечно, мы примем решение, которое является самым простым и наиболее удовлетворяющим эстетически, и, несомненно, скажем, что атом - это часы, а теория относительности верна. Но если мы примем этот простой взгляд, мы также должны культивировать постоянное сознание того, что в какой-то момент в будущем неприятности могут возникнуть именно здесь.

Мне кажется, что логическая позиция общей теории относительности просто такова: для любой физической системы возможно присвоить значения ds таким образом, чтобы соотношения, математически выведенные с помощью принципа относительности, соответствовали соотношениям между измеримыми величинами в физической системе; но то, что вещи, которые мы физически называем ds , являются чем-то большим, чем приблизительная связь с ds , требуемыми для получения математических соотношений, в настоящее время является не более чем благочестивой верой.

Возвращаясь к концепции времени, мы уже заявляли, что существуют две основные проблемы: измерение времени в одной точке пространства и распространение временной системы на все пространство. Второй аспект проблемы - это тот, на который было направлено внимание теории относительности; следующее подробное рассмотрение показывает, как операции теории относительности по установке и синхронизации часов в удаленных местах связаны с измерением пространства. Фундаментальный постулат заключается в том, что настройка часов должна осуществляться с помощью световых сигналов. Синхронизация часов теперь достаточно проста. Мы просто требуем, чтобы световые сигналы, посылаемые от главных часов с интервалом в одну секунду, поступали на любые удаленные часы с интервалом в одну секунду, измеряемым ими, и мы изменяем частоту удаленных часов до тех пор, пока они не будут измерять эти интервалы как одну секунду. После регулировки скорости дистанционные часы должны быть *установлены* таким образом, чтобы при отправке светового сигнала с главных часов в указанное нулевое время прибытия, записанное на удаленных часах, было таким, чтобы расстояние часов от главных часов, деленное на время прибытия, давало скорость света, предполагаемую уже известной. Эта операция включает в себя измерение расстояния от удаленных часов, так что при распространении временных координат по пространству измерение пространства задействовано по определению, и, следовательно, измерение времени не является самодостаточной вещью. Это физическая основа для рассмотрения пространства и времени как четырехмерного многообразия. Хотя математически числа, измеряющие пространство и время, входят в формулы симметрично, тем не менее физические операции, с помощью которых получают эти числа, совершенно различны и никогда не сливаются, и я считаю, что видеть в возможности четырехмерной обработки нечто большее, чем чисто формальный вопрос, может привести только к путанице.

Следовательно, понятие протяженного времени включает измерение пространства. Интересный вопрос заключается в том, включает ли понятие локального времени также измерение пространства. Строгий ответ на этот вопрос предполагает предоставление спецификаций для конструкции часов, которые, как мы видели, еще не были выполнены. Однако мне кажется вероятным, что построение даже единственных локальных часов каким-то образом связано с *измерением* пространства. Если, например, мы используем вибрирующий камертон, мы должны определить, как время вибрации зависит от амплитуды вибрации, и это

включает измерение в пространстве, или если мы используем вращающийся маховик, мы должны скорректировать изменение момента инерции из-за изменения размеров, когда он приводится в движение или приводится в гравитационное поле, и все это включает измерение в пространстве. Однако эти соображения не являются однозначными, и, возможно, вопрос не важен.

Теперь следует принять во внимание, что на практике концепция местного времени не полностью отделена от концепции протяженного времени, поскольку два тела не могут занимать одно и то же пространство одновременно, а время любого события фактически измеряется прибором на некотором расстоянии, при этом связь поддерживается с помощью световых или упругих сигналов. Но опыт убеждает нас, что в конечном итоге, по мере приближения измеряемого явления к часам, нет никакой измеримой разницы, поддерживается ли связь с часами с помощью света, акустических или тактильных сигналов, так что в физической практике мы пришли к принятию измерения времени событий в непосредственной близости от часов (местного времени) как одной из предельно простых вещей, за пределы которой мы не пытаемся заходить.

Таким образом, местное время - это концепция, к которой физики даже сейчас относятся как к простой и не поддающейся анализу. Именно эту концепцию имеет в виду большинство людей, когда они думают о времени. Согласно этой концепции, время - это нечто, обладающее свойствами локального времени; именно что-то такого рода Ньютон, должно быть, подразумевал под своим абсолютным временем, и именно молчаливое сохранение такого рода концепции ответственно за трудности, столь часто встречающиеся при понимании идеи относительности одновременности, которая, конечно, совершенно чужда нашему опыту одновременности в локальном времени. Изучение операций, связанных с расширением времени, показало, насколько концепция расширенного времени отличается от концепции простого местного времени; это различие приводит к существенно отличающимся числовым соотношениям, когда мы имеем дело с высокими скоростями или большими расстояниями. Опыт доказывает, что местное время не является удовлетворительной концепцией для рассмотрения событий, разделенных большими расстояниями в пространстве, или явлений, связанных с высокими скоростями. Например, мы не должны говорить о возрасте луча света, хотя понятие возраста является одним из простейших производных от понятия местного времени. Мы также не должны позволять себе думать о событиях, происходящих на Арктуре *сейчас*, со всеми коннотациями, связанными с событиями, происходящими *здесь сейчас*. Трудно подавить эту привычку думать, но мы должны научиться это делать. Очень сильно наивное ощущение, что разговор обо всем текущем состоянии Вселенной *что-то* значит, независимо от процесса, с помощью которого мы определяем новости о состоянии отдаленных частей. Я полагаю, что исследование этого чувства покажет, что оно носит психологический характер; то, что мы подразумеваем под тотальностью настоящего, - это просто все текущее содержание нашего сознания. Это, по-видимому, простая прямая вещь; мы не осознаем, пока не проведем дальнейший анализ, что наше нынешнее осознание существования луны или звезды обусловлено световыми сигналами, и что, следовательно, кажущееся простым непосредственное осознание событий, удаленных в пространстве, включает сложные физические операции.

Точно так же, если мы продолжим использовать местное время, то при переходе на большие скорости столкнемся с проблемами с нашей простой концепцией скорости, которая может быть

определена в терминах комбинации концепций пространства и времени. Таким образом, концепция местного времени теряет свою ценность и становится просто затупленным инструментом, когда мы пытаемся вывести ее за пределы первоначального диапазона. Но концепция расширенного времени, которой мы должны заменить местное, - это сложная вещь, к которой мы сами еще не привыкли; возможно, она окажется настолько сложной, что никогда не станет очень полезным интуитивным инструментом мышления.

Все эти рассуждения о времени касались только интервалов такого порядка величины, что их легко пережить любому человеку. Если нам приходится иметь дело с очень длинными или очень короткими интервалами, очевидно, что меняется вся наша процедура, и, следовательно, меняется концепция. Распространяя концепцию времени, например, на эпохи, отдаленные в прошлом, мы, как всегда, стараемся выбирать новые операции таким образом, чтобы они постоянно соответствовали операциям обычного опыта. Точный анализ изменения концепции времени применительно к отдаленному прошлому, по-видимому, не имеет большого значения для наших нынешних физических целей и здесь не будет предпринят. Однако, возможно, стоит отметить, что все наши другие концепции, а также концепция времени, должны быть изменены применительно к отдаленному прошлому; примером может служить концепция истины. Забавно пытаться выяснить, каков точный смысл с точки зрения операций такого утверждения, как это: "Это правда, что мидянин Дарий встал в 6:30 утра в день своего тридцатилетия".

Для наших физических целей большее значение имеет модификация, которой подвергается концепция времени при применении к очень коротким интервалам. Какой смысл, например, в утверждении, что электрон при столкновении с определенным атомом останавливается за 10^{-18} секунд? Я полагаю, что здесь ситуация очень похожа на ту, что сложилась в отношении коротких отрезков. Природа физических операций полностью меняется, и, как и прежде, они включают операции электрического и оптического характера. Непосредственное значение 10^{-18} заключается в том, что число, подставляемое в уравнения оптики, согласуется с наблюдаемыми фактами. Таким образом, короткие промежутки времени приобретают смысл только в связи с уравнениями электродинамики, достоверность которых сомнительна и которые могут быть проверены только в терминах пространственно-временных координат, которые в них входят. Здесь тот же порочный круг, который мы обнаружили ранее. И снова мы обнаруживаем, что концепции сливаются воедино на пределе экспериментально достижимого.

Это обсуждение концепции времени, несомненно, покажется некоторым поверхностным, поскольку в нем не упоминаются *свойства* физического времени, к которому должна применяться эта концепция. Например, мы не обсуждаем одномерное течение времени или невозвратимость прошлого. Такое обсуждение, однако, выходит за рамки нашей нынешней цели и завело бы нас глубже, чем я считаю нужным, и, возможно, за грань самого смысла. Наше обсуждение здесь ведется с точки зрения операций: мы предполагаем, что операции должны быть заданы, и не пытаемся спросить, почему были выбраны именно эти операции или не могут ли другие оказаться более подходящими. Такие свойства времени, как его безвозвратность, неявно содержатся в самих операциях, а физическая сущность времени скрыта в том долгом физическом опыте, который научил нас тому, какие операции приспособлены для описания и соотнесения природы. Однако мы можем отвлечься, чтобы рассмотреть один вопрос. Довольно часто говорят об изменении направления течения времени. В частности, например, при обсуждении уравнений механики показано, что если изменить направление течения времени на обратное, то вся история системы повторяется заново. Иногда добавляется утверждение, что

такое обращение вспять на самом деле невозможно, потому что одно из свойств физического времени - всегда течь вперед. Если это последнее утверждение подвергнуть операционному анализу, я полагаю, что оно окажется вовсе не утверждением о природе, а просто утверждением об операциях. *Бессмысленно* говорить о движении времени назад: по определению, *движение вперед* - это направление, в котором течет время.

КОНЦЕПЦИЯ ПРИЧИННОСТИ

Концепция причинности, несомненно, является одной из самых фундаментальных, возможно, такой же фундаментальной, как концепция пространства и времени, и поэтому, по крайней мере, в равной степени имеет право на первое место в обсуждении. Но, как обычно понимается, концепция причинности имеет определенные пространственные и временные последствия, так что ее лучше всего обсуждать в таком порядке после нашего рассмотрения пространства и времени.

Существует аспект концепции причинности, который во многих отношениях тесно связан с вопросом "объяснения", поскольку поиск причин события обычно предполагает в то же время поиск его объяснения. Но, тем не менее, существуют достаточные различия, требующие отдельного обсуждения.

Кажется совершенно очевидным, что изначально в концепции причинности присутствовал анимистический элемент, во многом подобный тому, что содержится в концепции силы, которая будет обсуждаться позже. Физическая суть концепции в том виде, в каком мы ее сейчас имеем, максимально освобожденная от анимистического элемента, по-видимому, заключается примерно в следующем. В первую очередь мы предполагаем изолированную систему, на которой мы можем проводить неограниченное количество идентичных экспериментов, то есть система может запускаться заново из определенного начального условия так часто, как это необходимо.^[9]

^[9]Мы должны в целом включать в понятие "начальное состояние" прошлую историю системы. Чтобы не делать это условие настолько широким, чтобы разрушить само себя, мы должны добавить наблюдение о том, что на самом деле идентичность прошлой истории необходима лишь в течение сравнительно короткого промежутка времени. Логическая точность здесь кажется недостижимой — сами физические концепции не обладают необходимой точностью.

Далее мы предполагаем, что при таком запуске система всегда проходит через точно такую же последовательность событий во всех своих частях. Это содержит предположение, что ход событий протекает независимо от абсолютного времени, в которое они происходят — свойства Вселенной не меняются со временем.^[10] Опыт показывает, что системы с такими свойствами действительно существуют. Альтернативный способ изложения нашей фундаментальной гипотезы заключается в том, что две или более изолированных похожих систем, стартовавших из одних и тех же начальных условий, проходят через один и тот же ход событий в будущем. На

данную таким образом систему, которая сама по себе управляет определенным ходом событий, мы предполагаем, что можем наложить извне определенные изменения, которые не имеют никакой связи с предыдущей историей системы и являются совершенно произвольными. Теперь, конечно, в природе, какой мы ее наблюдаем, не существует такой вещи, как произвольное изменение, не связанное с прошлой историей, так что, строго говоря, наше предположение является чистой фикцией. Именно здесь анимистический элемент, по-видимому, все еще сохраняется, хотя, возможно, и не обязательно.

[10] Как это часто бывает в физике, мы, похоже, делаем здесь две вещи одновременно. Сомнительно, можем ли мы придать значение "определенному начальному состоянию" отдельно от будущего поведения системы, так что у нас нет реального права выводить из единообразного будущего поведения как постоянство законов природы, не зависящих от времени, так и постоянство начального состояния. Я очень сомневаюсь, что тщательный операционный анализ показал бы, что здесь действительно существуют две независимые концепции, и является ли использование двух формально совершенно разных концепций чем-то большим, чем удобство выражения. Мне кажется, что спрашивать, не зависят ли законы природы от времени, может быть так же бессмысленно, как спрашивать у Клиффорда, не меняется ли абсолютная шкала величин по мере перемещения солнечной системы в пространстве.

Мы считаем, что наши действия не определяются внешним миром, так что изменения, производимые во внешнем мире актами нашей воли, с определенной степенью приближения являются произвольными. Таким образом, система, с которой мы экспериментируем, способна изолироваться от нас в том смысле, что мы можем считать себя вне системы и не имеющими с ней никакой связи. Более того, система способна к изоляции от остальной физической вселенной, поскольку события, происходящие вне системы, не имеют никакой связи с теми, что происходят внутри.[11] Опыт дает основание предполагать, что физическая изоляция такого рода возможна. На самом деле, конечно, изоляция никогда не бывает полной, а только частичной, предположительно до любой желаемой степени приближения.

[11] И здесь концепция "изоляции" или "соединения" определяется только в терминах поведения системы, и неясно, действительно ли это операционально независимое понятие или нет.

Утверждение о том, что две совершенно похожие изолированные системы, исходящие из одних и тех же начальных условий (включая прошлую историю в общей идее начального состояния), пройдут через один и тот же будущий ход событий, предполагает в качестве следствия, что если в поведении двух таких внешне похожих систем возникают различия, то эти различия являются свидетельством других предыдущих различий. Тезис о том, что это соответствует опыту, может быть назван тезисом о существенной связности и, возможно, является самым широким из имеющихся у нас: это тезис о том, что различия между поведением систем возникают не изолированно, а связаны с другими различиями. По сути, это тот же тезис, что и уже упомянутый в связи с "объяснением", а именно, что любое явление природы можно соотнести с другими явлениями.

Если теперь связь или корреляция между явлениями особого рода, у нас есть причинно-следственная связь; а именно, если всякий раз, когда мы произвольно воздействуем на

событие А в системе, мы обнаруживаем, что событие В всегда происходит, тогда как, если бы мы не воздействовали на А, В не произошло бы, тогда мы говорим, что А является причиной В, а В - следствием А. Правильно выбрав событие А, мы можем определить эффект любого события, к которому восприимчива система.

Отношение между А и В несимметрично по самой природе определения, причиной является произвольный переменный элемент, а следствием - то, что ему сопутствует. Более того, А, очевидно, может быть причиной более чем одного события В, а может вызвать целую цепочку событий.

Каузальная концепция, анализируемая таким образом, ни в коем случае не является простой. У нас нет простого события А, причинно связанного с простым событием В, но вся подоплека системы, в которой происходят события, включена в концепцию и является ее жизненно важной частью. Если бы система, включая ее прошлую историю, была другой, характер отношений между А и В мог бы полностью измениться. Таким образом, концепция причинности является относительной, поскольку она включает в себя всю систему, в которой происходят события.

На практике мы сейчас делаем чрезвычайно важный шаг и стремимся расширить концепцию и избавиться, насколько это возможно, от ее относительности. Опыт показывает, что часто существует большое количество систем, в которых А является причиной В. Во многих случаях причинно-следственная связь сохраняется в таком очень широком диапазоне систем, что мы полностью теряем систему из виду и приходим к предположению, что у нас есть *абсолютная* причинная связь между А и В. Например, когда я бью в колокол и слышу звук, причинно-следственная связь сохраняется в таком огромном количестве различных типов систем, что я мог бы подумать, что здесь есть абсолютная причинно-следственная связь. Такая абсолютная причинно-следственная связь означала бы, что всегда, при любых обстоятельствах, удар колокола сопровождается звуком. Но все условия означают только все те условия, которые охватываются экспериментом. Таким образом, в случае с колоколом все наши эксперименты проводились в присутствии атмосферы. Причинно-следственная связь между ударом колокола и этим звуком в принципе всегда должна была признаваться как относящаяся к присутствию атмосферы. Действительно, более поздние эксперименты в отсутствие атмосферы показывают, что атмосфера действительно играет существенную роль. Теперь, на самом деле, атмосферу так сравнительно легко удалить, что мы очень легко включаем ее в цепочку причинно-следственных связей. Но если бы атмосферу было невозможно удалить, подобно древнему пространственному эфиру, наше представление о причинно-следственных связях между ударом колокола и его звуком могло бы быть совершенно иным. В реальных физических приложениях концепции причинности постоянный фон, который поддерживается во время всех изменений, посредством которых устанавливается причинно-следственная связь, обычно должен быть выведен из контекста.

Возможно, всеобщий опыт свидетельствует о том, что событие А сопровождается не только одним событием, которое по определению является следствием А, но и А влечет за собой целую причинно-следственную цепочку событий. По-видимому, из опыта можно сделать обобщение, что причинно связанная цепочка событий, начатая А, является бесконечной цепочкой, при условии, что система достаточно велика. Возможно, в общем случае в этом нет необходимости, но если событие А включает в себя передачу внешней энергии системе или действие внешней силы (изменение импульса), в этом не может быть никаких сомнений.

То, что существует причинно-следственная цепочка, начатая А, особенно очевидно, если А и В разделены в пространстве. Таким образом, в случае с колоколом импульс, передаваемый воздуху вибрацией колокола, распространяется по воздуху в виде упругой волны, которая, таким образом, образует причинно-следственную цепочку событий. Явление распространения характерно для причинно-следственных связей механического характера и является оправданием введения концепции времени в связи с концепцией причинности, где оно сейчас появляется впервые. Очевидно, что когда возмущение распространяется на удаленную точку, *следствие следует* за причиной во времени, поскольку время обычно измеряется.

Мы расширяем этот результат и обычно думаем, что следствие *обязательно* следует за причиной. Теперь мы рассмотрим, является ли это необходимым результатом концепции причинности. Если мы хотим говорить о времени событий в разных местах, у нас должен быть какой-то способ установки часов по всему пространству. Если это делается произвольно, то нет необходимой связи между локальными часами причины и ее следствия, но, тем не менее, концепция причинности предполагает определенное временное отношение даже в этом самом общем случае. Предположим, что событие А происходит в точке 1, а его следствие, событие В, - в точке 2. Мы размещаем сообщника в точке 2, который посылает световой сигнал (или любой другой вид сигнала) на 1, как только событие В происходит в точке 2. Тогда из природы концепции причинности вытекает, что сигнал не может поступить на 1 до того, как произойдет событие А. Ибо, если бы это произошло до А, мы должны были бы просто не выполнять А, которое, согласно гипотезе, является произвольным и полностью находится под нашим контролем, и тогда было бы нарушено наше предположение о том, что система такова, что событие В происходит только тогда, когда также происходит А. Тот же аргумент показывает *тем* более, что если следствие В происходит в том же месте, что и его причина А, оно не может предшествовать ему по времени. Я не вижу, чтобы природа концепции причинности налагала какие-либо дополнительные ограничения на время В. Ограниченный принцип относительности, однако, постулируя, что никакой сигнал не может распространяться быстрее светового сигнала, фактически делает дополнительное предположение о временной связи причинно связанных событий, а именно, что событие В в точке 2 не может произойти до прихода в точку 2 светового сигнала, который начался с 1 в тот момент, когда А произошло в точке 1. Ибо, если бы В произошло раньше, мы могли бы использовать события А и В в качестве сигнального кода, тем самым нарушая нашу гипотезу.

Таким образом, существует теснейшая связь во времени, когда время растягивается в пространстве, как предписывает теория относительности, между причиной и следствием в зависимости от их разделения в пространстве; отсюда возникает концепция относительности причинного конуса, который в четырехмерном многообразии пространства-времени отделяет совокупность всех тех событий, которые могут быть причинно связаны, от совокупности тех, которые разделены таким небольшим интервалом во времени и таким большим интервалом в пространстве, что связь световыми сигналами и, следовательно, причинно-следственная связь невозможны. Учитывая теперь два события А и В, которые связаны как причина со следствием в одной системе отсчета, тогда они должны быть причинно связаны также и в любой другой системе отсчета. Ибо, если бы это было не так, мы могли бы по определению причинности подавить событие А в одной из систем, в которых причинно-следственная связь не соблюдается, а это, в силу природы концепции события, предполагает подавление А во всех системах, тем самым нарушая нашу гипотезу о причинно-следственной связи в исходной системе. Концепция события, задействованная в этом аргументе, будет рассмотрена позже.

Таким образом, оказывается, что фундаментальный постулат теории относительности (о том, что форма законов природы одинакова во всех системах отсчета) требует, чтобы временной порядок причинно связанных событий был одинаковым во всех системах отсчета.

Часто предполагается, что вся вселенная в данный момент причинно связана со всеми последующими состояниями. Это означает, что если бы мы могли повторить опыт, исходя из одних и тех же начальных условий, то будущий ход событий всегда был бы одинаковым. Истинность этого убеждения никогда не может быть проверена прямым экспериментом, но это то, к чему мы приходим с помощью обычного физического процесса последовательного приближения. Трудно точно сформулировать, что мы подразумеваем под "настоящим" состоянием вселенной, и есть все основания полагать, что такая формулировка не уникальна, но концепция содержит необходимый намек на то, что ни одно из событий, составляющих "настоящее", не может быть причинно связано. События в отдаленных местах, составляющие настоящее, должны быть разделены промежутком времени, меньшим, чем время, необходимое свету для прохождения пути между двумя местами.

Убеждение, возникающее из опыта, что будущее определяется настоящим и, соответственно, настоящее прошлым, часто формулируют по-другому, говоря, что настоящее причинно определяет будущее. Это в определенном смысле обобщение концепции причинности. Одной из основных задач физики является анализ этой сложной причинно-следственной связи на компоненты, представляющие, насколько это возможно, будущее состояние системы как сумму независимых последовательностей событий, начатых каждым отдельным событием настоящего. Насколько возможен такой анализ, должно быть решено экспериментально. Безусловно, в большинстве случаев это возможно в очень большой степени, но, по-видимому, нет оснований ожидать, что возможен полный анализ. Поскольку система поддается описанию в терминах линейных дифференциальных уравнений, причинные цепочки, запускаемые различными событиями, распространяются в пространстве и времени без помех и с простым сложением эффектов, и наоборот, настоящее может быть проанализировано обратно в виде простой суммы элементарных событий в прошлом, но если уравнения, управляющие движением системы, не являются линейными, эффекты не являются аддитивными, и такой причинный анализ по элементам невозможен. Здесь не следует делать акцент на *дифференциальном* аспекте уравнений: вполне возможно, что конечно-разностные уравнения могут обладать таким же свойством аддитивности. Хотя не может быть никаких сомнений в том, что линейные уравнения чрезвычайно преобладают, также не может быть никаких сомнений в том, что некоторые явления не могут быть описаны в терминах линейных уравнений (*например*, ферромагнетизм), так что, кажется, нет оснований думать, что причинно-следственный анализ всегда возможен. Я полагаю, однако, что предположение о том, что такой анализ на мелкомасштабные элементы возможен, молчаливо содержится в мыслях многих физиков. Если анализ невозможен, мы можем ожидать получения результатов в результате взаимодействия нескольких событий, которые не могут быть получены на основе результатов событий, происходящих по отдельности.

Когда возможен причинно-следственный анализ, нахождение простейших событий, которые выступают в качестве источника независимых цепочек причинных связей, эквивалентно нахождению конечных элементов в схеме объяснения, так что здесь мы сливаемся с концепцией объяснения, как уже упоминалось. Как и в случае с поясняющей последовательностью, здесь не может быть *формального* окончания причинной

последовательности, потому что мы всегда можем спросить о причине последнего члена. Но может оказаться физически бессмысленным расширять причинную последовательность за пределы определенной точки. Мы видели с точки зрения операций, что концепция причинности требует возможности изменения системы. Поэтому бессмысленно говорить, что А является причиной В, если мы не можем испытать системы, в которых А не встречается. Теперь, если, расширяя причинную последовательность, мы в конечном итоге придем к состоянию настолько широкому, что физически дальнейшие изменения невозможны, наша причинная последовательность должна прекратиться.

В соответствии с этим свойством концепции причинности причинная последовательность может завершаться либо формально, посредством постулата, либо естественным образом, в силу внутренней физической природы элементов последовательности. Таким образом, если мы скажем, что свет передается от точки к точке, потому что он распространяется средой с неизменяемыми свойствами, которая заполняет все пространство, которая всегда присутствует и никогда не может быть устранена физически, мы постулируем свойства среды, которые закрывают возможность дальнейшего исследования, потому что для того, чтобы сделать следующий шаг и спросить причину свойств эфира, требуется, чтобы мы были способны проводить эксперименты с измененным или отсутствующим эфиром. Такое окончание последовательности, очевидно, является чистым формализмом, не имеющим физического значения. Но другие соображения могут придать физическое значение. Таким образом, если существуют другие виды экспериментов, которые можно объяснить, предполагая универсальную среду с теми же свойствами, концепция оказывается не только полезной, но и имеющей определенную степень физического значения. Примером неизбежного прекращения причинно-следственной связи является уже упомянутая возможность того, что величина гравитационной постоянной может определяться общим количеством материи во Вселенной. Без дальнейших уточнений это совершенно бесплодное утверждение, но если можно показать, что существует простая числовая связь, вопрос приобретает интерес, и мы можем продолжить поиск корреляции между числовой связью и другими вещами.

Этот анализ концепции причинности не претендует на полноту и оставляет многие интересные вопросы нетронутыми. Возможно, один из наиболее интересных из этих вопросов заключается в том, можем ли мы разделить на причину и следствие два явления, которые *всегда* сопровождают друг друга, и, следовательно, является ли классификация явлений на причинно связанные группы исчерпывающей классификацией. Но обсуждение достаточно широкое для нашей цели здесь; наиболее важные точки зрения, которые необходимо усвоить, заключаются в том, что концепция причинности относится ко всему фону системы, которая содержит причинно связанные события, и что мы должны допустить возможность неограниченного числа идентичных экспериментов, так что концепция причинности применима только к подгруппам событий, выделенным из совокупности всех событий.

КОНЦЕПЦИЯ ИДЕНТИЧНОСТИ

Одним из наиболее фундаментальных из всех понятий, с помощью которых мы описываем внешний мир, является понятие идентичности; фактически, мышление было бы почти невысказуемо без такого понятия. С помощью этой концепции мы перекидываем мост через течение времени; она позволяет нам сказать, что конкретный объект в нашем настоящем опыте совпадает с объектом нашего прошлого опыта. С точки зрения операций значение идентичности определяется операциями, с помощью которых мы выносим суждение о том, что этот объект является *тем же*, что и объект из моего прошлого опыта. На практике существует множество косвенных способов вынесения такого суждения, но я полагаю, что суть ситуации заключается в возможности непрерывной связи между объектом настоящего и прошлого путем непрерывного наблюдения (прямого или косвенного) на протяжении всего промежуточного периода времени. Мы должны, например, уметь непрерывно смотреть на объект и утверждать, что пока мы смотрим на него, он остается тем же самым. Это предполагает обладание объектом определенными характеристиками — это должна быть дискретная вещь, отделенная от своего окружения сохраняющимися физическими разрывами. Таким образом, концепция идентифицируемости применима только к определенным классам физических объектов; никому и в голову не приходит пытаться отождествить сегодняшний ветер со вчерашним. Несколько легче идентифицировать жидкость, такую как вода, по ее течению в потоке, потому что мы можем сделать движение воды видимым по взвешенным в ней твердым частицам, но даже здесь нелегко доказать придирчивому критику, что мы идентифицируем действительно воду, а не взвешенные частицы твердого вещества. Даже твердые тела, когда наши измерения достаточно уточнены, кажется, теряют свои прерывистые границы, как было предложено при обсуждении приблизительного характера экспериментальной арифметики, и концепция идентичности становится туманной.

Не может быть никаких сомнений в том, что концепция идентичности - это инструмент, идеально приспособленный для приблизительного рассмотрения природы в области нашего обычного опыта, но мы должны задать более серьезный вопрос. Разве очевидная потребность нашего мыслительного аппарата в наличии дискретных и идентифицируемых объектов для размышления не накладывает очень существенных ограничений на любую картину физической вселенной, которую мы способны сформировать? Мы постоянно удивляем самих себя изобретением дискретной структуры, спускаясь все ниже и ниже по шкале вещей, ведь единственный *смысл существования* заключается исключительно в нас самих. Таким образом, Осборн Рейнольдс [12] серьезно и наиболее детально размышлял об атомной структуре эфира, и мы находим, что Эддингтон [13] намекает на существование структура величиной порядка 10^{-40} см. В гораздо большем масштабе величины мы также мыслим в тех же терминах и представляем положительные и отрицательные элементарные заряды с твердыми и непроницаемыми ядрами, что предполагает полное изменение закона взаимодействия в точках, достаточно близких друг к другу. Какой физической гарантией мы располагаем в том, что электрон, прыгающий в атоме, сохраняет свою идентифицируемость каким-либо образом, подобным тому, как мы предполагаем, или что концепция идентичности здесь вообще применима?

[12] Осборн Рейнольдс, "Субмеханика Вселенной", 254 стр., издательство Кембриджского университета, 1903.

[13] А. С. Эддингтон, Отчет о гравитации, Лон. Физ. соц., 1918, с. 91.

Фактически, концепция идентичности, по-видимому, теряет всякий смысл с точки зрения реальных операций на этом уровне опыта.

Кажется, что разум по существу неспособен иметь дело с непрерывностью как свойством физических вещей; он даже не способен говорить о непрерывности иначе, как в негативных терминах. На каждую попытку описания свойств действительно непрерывной субстанции он может сказать "Нет, это не то", но не может представить себе опыт, соответствующий тому, как, по его мнению, должна ощущаться действительно непрерывная вещь. С точки зрения операций непрерывность имеет лишь своего рода негативное значение. Теперь определенные последствия этой неспособности разума могут быть устранены соответствующими постулатами, как, например, мы можем постулировать полное уничтожение негатива положительным зарядом, как это сейчас делается в определенных спекуляциях.^[14] В этом есть смысл, потому что аннигиляция двух зарядов имеет физический смысл. Но вопрос в том, можно ли устранить все последствия этой привычки мышления и не будет ли любая картина природы, которую мы можем сформировать, окрашена бледным оттенком мысли.

^[14] Например, J. H. Jeans, Nat. 114, 828-829, 1924.

Оперативный взгляд предполагает, что в этом последнем вопросе мы подходим опасно близко к бессмысленному вопросу, хотя в определенном смысле здесь есть смысл. На самом деле может оказаться, что мы не сможем углубиться в мелкомасштабные явления глубже определенной точки, и что природа будет казаться конечной в нисходящем направлении, так что мы упремся в своего рода стену. Но спрашивать в такой ситуации, пришли ли мы к концу, потому что природа *действительно* конечна, или нам только кажется, что мы подошли к концу из-за какого-то свойства нашего разума, такого как неспособность иметь дело с непрерывностью, - это, я полагаю, бессмысленный вопрос.

В реальном использовании концепция идентичности расширяется, и идентичность используется в иных смыслах, чем фундаментальный, рассмотренный выше. Например, мы говорим о двух наблюдателях, видящих один и тот же объект, или, если объект движется или что-то делает, мы можем говорить о двух наблюдателях, воспринимающих одно и то же событие. Событие, относительно которого возможно суждение об одинаковости, когда оно воспринимается разными наблюдателями (или математически выражается при наблюдении в двух системах отсчета), - это то, что мы подразумеваем под событием, которое является одним из фундаментальных понятий теории относительности. Что же теперь входит в эту концепцию события, или что мы имеем в виду, когда говорим, что два наблюдателя переживают одно и то же событие? Первая грубая попытка могла бы сказать, что событие является одним и тем же, если оно одинаково описывается двумя наблюдателями. Но это приводит нас ко всем сложным вопросам значения языка, которых мы бы с удовольствием избежали, и, кроме того, это неверно, потому что свисток локомотива, например, не имеет одинаковой высоты для двух наблюдателей, движущихся с разной скоростью. Трудно дать удовлетворительный анализ ситуации, но я полагаю, что суть заключается в дискретном характере события, точно так же, как концепция идентичности, применяемая только к объектам, предполагает дискретность. Событие ограничено со всех сторон разрывами, как в пространстве, так и в времени. Теперь, по-видимому, результатом опыта является то, что разрывы имеют определенное абсолютное значение, поскольку существует однозначное соответствие между разрывами, наблюдаемыми в любой одной системе отсчета, и теми, которые наблюдаются в любой другой.

Соответствующие разрывы в двух системах отсчета по определению одинаковы. Событие по определению представляет собой совокупность всех явлений, ограниченных определенными разрывами, и две системы отсчета по определению описывают одно и то же событие, если границы разрыва события одинаковы, независимо от появления события в двух системах. Например, излучение светового сигнала является событием в соответствии с этим определением, хотя оно может проявляться как красный свет в одной системе отсчета и зеленый в другой.

Теперь мы видим, что концепция события - это лишь приблизительное понятие, как и концепция идентичности, и по той же причине, а именно, в опыте нет таких вещей, как резкие разрывы, но по мере того, как наши измерения становятся более точными, границы предполагаемых разрывов становятся размытыми. По мере того как мы переходим к меньшим масштабам величины, это размытие становится все более важным, пока физическая возможность выполнения тех операций, с помощью которых обнаруживаются разрывы, полностью не исчезает, и понятие события приобретает, с точки зрения операций, совершенно иное значение. Мы продолжаем думать о событии так же, как и раньше, в терминах ментальной модели, но истинное оперативное значение теперь зависит от конкретного рассматриваемого явления. Концепция события на самом деле не является чем-то одним и тем же применительно к испусканию кванта излучения атомом, или к испусканию гамма-излучения в результате радиоактивного распада, или к миганию сигнала от выключенного фонаря при открывании и закрывании затвора. Здесь, как всегда, когда наш диапазон опыта расширяется, мы должны быть готовы в какой-то момент в будущем обнаружить, что, распространив обычную концепцию события на явления малого масштаба с помощью ментальной модели, мы косвенно ввели в нашу картину явления, которых не существует, так что будет необходимо пересмотреть наше мышление, облекая его в термины, соответствующие непосредственному опыту.

ПОНЯТИЕ СКОРОСТИ

Понятие скорости в том виде, в каком оно обычно определяется, включает в себя два понятия - пространство и время. Операции, с помощью которых мы измеряем скорость объекта, таковы: сначала мы наблюдаем за временем, в которое объект находится в одном положении, а затем позже наблюдаем за временем, в которое он находится во втором положении, делим расстояние между двумя положениями на интервал времени и, при необходимости, когда скорость меняется, берем предел. Пока мы имеем дело с довольно низкими скоростями, нам не нужно тщательно выяснять, какое время мы используем при этих операциях, но когда скорости становятся высокими, мы должны позаботиться о том, чтобы использовать местное время в двух положениях тела, что означает, что у нас должна быть система времени, распределенная по пространству, или, другими словами, "расширенная" система времени. Эта концепция скорости, определенная таким образом, может быть использована в качестве инструмента при описании природы, и будет обнаружено, что природа обладает определенными свойствами; например, скорость света составляет 3×10^{10} см/сек. Кроме того, ни одному материальному

предмету нельзя придать такую высокую скорость, но по мере приближения его скорости к этому значению требуются неограниченные приращения энергии.

Но теперь это в значительной степени вопрос для изучения, было ли разумно выбрано понятие скорости, определенное таким конкретным способом, в качестве инструмента для описания природных явлений. Вполне возможно модифицировать концепцию скорости, то есть установить другие операции, которые соответствуют нашему инстинктивному ощущению того, что такое скорость в терминах непосредственного ощущения, и таким образом, чтобы все числовые показатели оставались неизменными при низких скоростях.^[15] Например, пассажир в автомобиле измеряет свою скорость, наблюдая за часами на приборной доске и километровыми столбиками, которые он проезжает по дороге. Эта операция отличается от приведенного выше определения тем, что время больше не является расширенным временем, а является местным временем движущегося объекта. Пространственные координаты, используемые в этой альтернативной операции, на первый взгляд кажутся гибридными, но это то, что наблюдатель на самом деле использовал бы наиболее естественно: это то, что он измерил бы рулеткой, прикрепленной к точке дороги и имеющей возможность разматываться по мере продвижения, или то, что измеряется судном в море с помощью бревенчатого троса, выпущенного сзади.

^[15]Для психолога интересен вопрос о том, не является ли понятие скорости более примитивным в порядке восприятия, чем понятие времени, и не выводится ли понятие времени из наблюдения за объектами в движении, или действительно существует какая-либо необходимая связь вообще между скоростью и временем с точки зрения неопытного опыта.

Или есть еще один наиболее интересный способ определения скорости, при котором анализ пространства и времени вообще не производится, но скорость измеряется непосредственно путем наращивания заданной скорости путем физического добавления произвольно выбранной единицы скорости. Этот вопрос довольно подробно обсуждается в моей книге *"Размерный анализ"*,^[16] но здесь достаточно уместно кратко описать. Во-первых, мы можем сконструировать конкретный стандарт скорости, например, натянув бечевку между двумя колышками на доске с фиксированным весом. Если мы ударяем по струне, вдоль струны распространяется возмущение, за которым мы можем следить глазом, и мы определяем единичную скорость как скорость этого возмущения. Объект имеет скорость больше единицы, если он обгоняет помеху, и меньше, если он отстает. Теперь мы можем повторить наш стандарт, сделав другую доску с колышками и натянутой бечевкой, и проверить равенство двух скоростей, наблюдая, что два возмущения проходят вместе. Теперь мы определяем две единицы скорости как скорость всего, что движется при натяжении струны второй доски, когда вторая доска приводится в движение целиком с такой скоростью, что она движется при натяжении первой струны. Процесс может быть продлен до бесконечности и измерена любая скорость.

^[16]Издательство Йельского университета, 1922.

Если бы было принято любое из этих двух альтернативных определений скорости, то оказалось бы, что скорость света бесконечна. Далее, не было бы предела скорости, которую можно было бы придать материальным телам, наделив их неограниченной энергией, и это то, что мы готовы считать естественным и простым из обычного опыта. С другой стороны, бесконечная скорость света в высшей степени неестественна, особенно если мы придерживаемся средней точки зрения. Здесь мы сталкиваемся с дилеммой — все виды явлений не могут одновременно рассматриваться просто. Если мы придаем поведению материальных тел самое фундаментальное значение, нам не мешало бы принять одно из альтернативных определений скорости. Если, с другой стороны, мы рассматриваем явления света как наиболее фундаментальные, мы постараемся сформулировать наше определение таким образом, чтобы свойства света были простыми. Это была именно точка зрения Эйнштейна; для всей его схемы ограниченной теории относительности характерно, что свет является фундаментальной вещью, и это повлияло на принятие им первого определения скорости. Теперь никто не может спорить с этим желанием сделать свет фундаментальным (мудрость этого должна быть оправдана результатами), и если свойства света рассматривать математически, можно легко увидеть желательность избавления от бесконечных атрибутов и, таким образом, признать желательность сделать скорость света конечной. Но все это предполагает другое очень коварное допущение, которое мы сами молчаливо использовали во всех наших предыдущих обсуждениях, а именно, что понятие скорости вообще в собственном смысле относится к свету. Эйнштейн совершенно определенно принял эту точку зрения, и таким образом определил характер всей структуры теории относительности. Напротив, я полагаю, что следует поставить под очень серьезный вопрос, следует ли отождествлять свет с *движущимся* предметом, что связано с применением концепции скорости. Однако это обсуждение следует отложить до тех пор, пока мы не разберемся со свойствами света. В настоящее время нам важно отметить, что фактически используемое определение скорости включает концепцию длительного времени и что можно было бы определять скорость по-разному, что придало бы совершенно иной облик явлениям при высоких скоростях, но оставило бы нетронутым наш обычный опыт.

Скорости, при которых становится важной точная форма определения, выше, чем могут быть достигнуты при обычных механических экспериментах. Такие скорости могут быть достигнуты в земных лабораториях только с наэлектризованными частицами, как в экспериментах с высоким вакуумом или с радиоактивными распадами. Интересно отметить, что мы очень редко пытаемся напрямую измерить скорость в таких экспериментах, следуя за дискретной частицей в ее полете и находя время, необходимое для прохождения измеренного расстояния, но скорости измеряются косвенно, путем расчета на основе уравнений электродинамики и в терминах таких непосредственно наблюдаемых явлений, как кривизна траектории. Это правда, что в одном или двух экспериментах была предпринята попытка более прямого измерения скорости, но, похоже, здесь есть место для дополнительной работы.

ПОНЯТИЯ СИЛЫ И МАССЫ

Другим очень важным понятием является понятие силы. Поскольку обычный анализ обнаруживает связь между силой и ускорением, а ускорение включает скорость, это естественное место для обсуждения силы. Эта концепция была подвергнута тщательному анализу различными авторами. По своему происхождению концепция, несомненно, возникает из мышечных ощущений сопротивления, испытываемого внешними телами. Эту грубую концепцию можно сразу же перевести на количественную основу, заменив наши мышцы пружинными весами, или вместо пружинных весов мы можем использовать любое упругое тело и измерить прилагаемую им силу в терминах его деформации. Конечно, различные меры предосторожности, которые необходимо предпринять при физическом воплощении этой идеи, сложны; вопрос о мерах предосторожности против перепадов температуры, например, является одним из наиболее легко понятных. Понятие силы, определенное таким образом, ограничено статическими системами; задача статики состоит в том, чтобы найти соотношение между силами в системах, находящихся в состоянии покоя. Затем мы распространим концепцию силы на неравновесные системы, в которых имеются ускорения, и мы должны представить себе, что сначала все наши эксперименты проводятся в изолированной лаборатории далеко в пустом пространстве, где нет гравитационного поля. Здесь мы сталкиваемся с новой концепцией массы, которая в первоначальном виде связана с концепцией силы, но позже может быть распутана в процессе последовательных приближений. Детали различных этапов процесса аппроксимации очень поучительны, поскольку типичны для всех методов в физике, но здесь нет необходимости вдаваться в подробности. Достаточно сказать, что в конечном итоге мы можем присвоить каждому твердому материальному телу числовую характеристику тела, так что произведение этого числа на ускорение, которое оно получает под действием любой заданной силы, приложенной к нему пружинными весами, численно равно силе, причем сила определяется, за исключением поправки, в терминах деформации весов, точно так же, как это было в статическом случае. В частности, соотношение, обнаруженное между массой, силой и ускорением, применимо к самим пружинным весам, с помощью которых прикладывается усилие, так что необходимо внести поправку на уменьшение силы, оказываемой весами, возникающей из-за их собственного ускорения.

Теперь мы расширяем область наших измерений, перенося нашу лабораторию в гравитационное поле Земли, и сразу же наш опыт расширяется, поскольку мы постоянно видим тела, ускоряющиеся без каких-либо пружинных весов (то есть без действующей на них силы). Мы расширяем понятие силы и говорим, что на любое ускоряемое тело действует сила, и величина этой силы определяется как та, которая была бы необходима для того, чтобы произвести в том же теле такое же ускорение с помощью пружинящего баланса в пустом пространстве. Это расширение имеет физическое обоснование в том смысле, что мы обнаруживаем, что можем устранить ускорение, которое тело приобретает в гравитационном поле, приложив к нему с помощью пружинных весов силу точно заданной величины в противоположном направлении. Это расширенное представление о силе также может быть применено к системам, в которых имеют место электрические воздействия.

Таким образом, мы видим, что при распространении понятия силы с тел, находящихся в состоянии покоя, на тела, находящиеся в движении, характер концепции изменился, поскольку изменились операции, с помощью которых измеряется сила — сила, действующая на тело, теперь измеряется в терминах его ускорения. Но при определении силы по ускорению мы должны знать массу. Эта масса должна быть независимо измерена с помощью первоначальной концепции силы; в противном случае у нас нет оснований для таких простых утверждений, как

то, что сила тяжести, действующая на тело, пропорциональна его массе. Все это относится к обычному диапазону экспериментов с малыми скоростями. Если теперь мы расширим диапазон измерений, то обнаружим явления, которых мы не ожидали; например, по-видимому, существуют трудности на пути неограниченного увеличения скорости материального тела, например заряженного атома. Мы начинаем задавать поисковые вопросы: зависит ли сила тяжести от скорости при высоких скоростях, или масса не зависит от скорости при тех же условиях или не зависит от гравитационного поля и т.д.?

Пытаясь ответить на эти новые вопросы, мы сталкиваемся с трудностями, связанными с концепциями, в терминах которых они сформулированы. Нет никаких операций, с помощью которых мы могли бы определить, не зависит ли сила от скорости, если мы сначала не узнаем массу, или каких-либо операций, с помощью которых масса может быть измерена, если мы не знаем силу. Чисто механические системы с наибольшими скоростями, о которых мы располагаем какими-либо экспериментальными данными, - это небесные тела. Их движение, за важным исключением Меркурия, предсказывается обычными законами механики, так что на первый взгляд может показаться, что мы имеем здесь подтверждение законов механики для тел со сравнительно высокими скоростями. Но следует помнить, что все, что мы можем наблюдать за небесными телами, - это их положения, и что мы не можем выполнять над этими телами все операции, с помощью которых мы можем проверить законы механики применительно к земным явлениям. Если бы, например, скорость одинаково влияла на массу и силу, с которой гравитация действует на массу, движение небесных тел было бы точно таким же, как наблюдаемое сейчас. Следовательно, по мере того, как мы увеличиваем диапазон скоростей, понятия силы и массы одновременно теряют свою определенность и становятся частично слитными. Это типично для того, чего мы теперь привыкли всегда ожидать вблизи предела экспериментально достижимого; опыт становится менее богатым, выбор физических операций более ограниченным, концепции меняются, и их становится все меньше. Если мы хотим сохранить то же формальное количество понятий, мы должны ввести произвольные соглашения или определения. Эти определения должны определяться в основном удобством. В случае механических систем этот мотив удобства подкрепляется соображениями, находящимися за пределами области механических явлений. Наибольшие скорости практики достигаются не в механических, а в электрических системах, в экспериментах с вакуумными лампами и т.д. Таким образом, соображения удобства диктуются с электрической точки зрения. Эти соображения будут рассмотрены гораздо более подробно позже; вывод - это все, что нам здесь нужно, а именно, что удобно предполагать для заряда электрона постоянное число, независимое от скорости, и это включает в себя изменение его массы определенным образом в зависимости от скорости. Теперь, если принять принцип относительности, масса механических объектов должна изменяться со скоростью точно так же, как масса электрических зарядов. Поскольку изменчивость этой последней фиксирована, механическая масса становится определенной функцией скорости, и, следовательно, сила также фиксирована в любом конкретном физическом случае.

Приведенное выше фундаментальное определение силы носит сугубо академический характер и предполагает проведение гипотетических экспериментов в лабораториях, расположенных далеко в пустом пространстве. Какая-то процедура, подобная этой, по-видимому, соответствует более или менее явным утверждениям, которые можно найти в литературе по механике. Значение, которое должно быть придано таким определениям с точки зрения реальных операций, предполагает сложные логические рассуждения. Мы установили бы гораздо более

тесную связь с условиями реального эксперимента, если бы в определении заменили гипотетические операции в пустом пространстве более или менее приблизительно реализуемыми операциями над телами, скользящими по ровным столешницам без трения. Я полагаю, что наше инстинктивное восприятие законов механики таково, что мы убеждены, что определения в терминах межзвездной космической лаборатории или ровной столешницы на самом деле одинаковы. Но в принципе мы должны признать, что когда операции различны, концепции различны, и если мы примем что-то эквивалентное определению столешницы, что, по-видимому, мы физически вынуждены делать, мы должны оставить открытой в нашем мышлении возможность обнаружения в нынешней полутени, когда наша точность достаточно возрастет, таких явлений, возможно, как характеристики направления массы в гравитационном поле.

Мы только что рассмотрели проблему, с которой сталкиваемся в обычных масштабах величины при переходе от низких скоростей к высоким; что происходит с понятиями силы и массы, когда мы переходим к очень малому масштабу? Вплоть до атомного масштаба мы можем, по крайней мере, умолчать о новых физических трудностях, поскольку, хотя мы, конечно, не можем экспериментировать с реальными атомами, мы, тем не менее, можем провести измерения броуновского процесса[17], например, движение взвесей в жидкостях, оседающих в гравитационном поле, и экстраполяция на атом не очень велика. Масса каждого отдельного атома получается с помощью того, что эквивалентно процессу подсчета, предполагающему закон сохранения массы в атомном масштабе. Это подтверждается всем химическим опытом. Массе составных частей атомов, электронов, также, возможно, может быть придано уникальное значение после того, как мы определимся с законами электрического поля путем экспериментов по ускорению в электрических полях. Принципиальный вопрос, который здесь интересует, заключается в том, какое значение, если таковое вообще имеется, следует придавать массе элементов электрона.

[17] Это явление подробно обсуждается в книге Дж. Перрена "Броуновское движение и молекулярная реальность", переведенной Ф. Содди, Тейлором и Фрэнсисом, Лондон, 1909.

Очевидно, что здесь мы выходим за пределы любого возможного опыта, по крайней мере в настоящее время, и этот опыт снова стал беднее, а наших концепций меньше. Все, что мы можем теперь потребовать, - это чтобы определенные комбинации чисел, некоторые из которых представляют механическую массу, а другие электрический заряд, имели надлежащие отношения друг к другу, будучи интегрированными по всему телу электрона. Аналогичные вопросы встают перед нами, когда мы спрашиваем, каковы силы, которые части электрона оказывают друг на друга. Мы возвращаемся к этому вопросу при рассмотрении природы электрических концепций. В любом случае, в этой области понятия как силы, так и массы полностью меняются.

Мимоходом интересно отметить, что современная электрическая теория не придает значения массе элементов электрона, поскольку общая электромагнитная масса электрона складывается из взаимных условий действия элементов — общая масса не является *линейной* величиной, возникающей в результате действия элементов.

КОНЦЕПЦИЯ ЭНЕРГИИ

При рассмотрении концепции энергии мы начнем с чисто механической энергии. В изолированных механических системах, в которых действуют только консервативные силы, сумма кинетической и потенциальной энергии постоянна. Кинетическая энергия может быть определена как $\sum \frac{1}{2} mv^2$, образующаяся для всех частей тела. Потенциальная энергия определяется положением частей системы и имеет физическое значение только применительно к базовому положению, то есть только изменения потенциальной энергии имеют значение с точки зрения операций. Таким образом, общая энергия, приписываемая системе, имеет элемент произвола в том смысле, что исходное положение может быть выбрано случайным образом, и энергия приобретает значение только при прослеживании истории до эпохи исходного положения.

Понятие энергии может быть распространено с механических систем на все системы, с которыми мы знакомы; операции, с помощью которых расширенному понятию энергии придается значение, включают обобщенный принцип сохранения, или первый закон термодинамики. Распространение на тепловые системы происходит незамедлительно; включение оптических и электрических систем в схему было наиболее важным физическим шагом, который, конечно, требовал тщательного экспериментального обоснования. Из-за широкого спектра применения концепция энергии в настоящее время стала рассматриваться как одна из важнейших в физике; этой идеи придерживался Оствальд [18] двадцать и более лет назад, и сейчас она находится на переднем крае из-за связи между массой и энергией, указанной теорией относительности, и важной роли, отводимой уровням энергии в спектральном анализе.

[18] W. Ostwald, Die Energie, Barth, Leipzig, 1908.

Какова теперь точная природа и значение общей энергетической концепции? Во-первых, свойство сохранения энергии является одним из простейших и наиболее очевидных свойств материи, так что в этом свойстве энергии усматривается причина для приписывания ей определенных свойств материи, в частности, и наиболее важного - локализации в пространстве. Однако мы должны признать, что эта идея местоположения в пространстве привнесена в ситуацию исключительно нами самими и не соответствует ничему, непосредственно данному в ходе эксперимента. Однако эта идея произвела наиболее важный эффект. Посмотрите, например, на важность, приписываемую открытию Кельвином функции, с помощью которой полная энергия электрического поля может быть представлена как распределенная в пространстве; [19] это была одна из важнейших опор точки зрения medium.

[19] Эта функция в $\frac{1}{8\pi}$ раз больше скалярного произведения электрической силы и смещения. Если принять определение смещения Максвелла, коэффициент $\frac{1}{8\pi}$ заменяется на $\frac{1}{2}$, и получается точная аналогия между энергией, запасенной в эфире, и упругой энергией, запасенной в изогнутой пружине.

Более критический анализ, вероятно, значительно уменьшит наше удовлетворение этой наивной аналогией, проведенной между материей и энергией. Что касается материи, мы все еще можем быть сносно удовлетворены нашим приписыванием материи местоположения в пространстве, но это совершенно иное в отношении сохранения материи. В каком именно смысле материя сохраняется? Конечно, не с точки зрения массы, как мы когда-то думали. Тем не менее, у нас, несомненно, есть ощущение, что здесь есть какое-то свойство сохранения, и мы вынуждены плохо формулировать его в терминах гипотетически постоянного числа протонов и электронов. Я долгое время думал, что Ньютон нащупывал какую-то очень похожую идею, когда он настолько забылся, что определил массу как количество материи, определение, совершенно бессмысленное для строгой и несимпатичной интерпретации. С другой стороны, какой бы смысл ни заключался в нашей идее сохранения материи, она определенно не похожа, по крайней мере в одном важном отношении, на сохранение энергии. Ибо энергия изолированной механической системы зависит от системы отсчета, в которой она описывается; просто задавая скорость системе отсчета и никоим образом не изменяя механическую систему, мы можем изменить ее кинетическую, а значит, и общую, энергию на любую прямую величину. Это даже отдаленно не напоминает обычную материю. Я не вижу, чтобы операции, эквивалентные концепции энергии, оправдывали нас в утверждении большего, чем то, что энергия является свойством материальной системы; операции, по-видимому, не придают какого-либо уникального значения местоположению, связанному с энергией.

Теперь мы спрашиваем, какое значение следует приписать тому виду сохранения, которым действительно обладает энергия. Сначала мы ограничимся механическими системами. Движения механической системы удовлетворяют определенным дифференциальным уравнениям второго порядка, и фактическое движение должно быть найдено путем интегрирования уравнений. В интеграле дифференциального уравнения появляются определенные константы, которые определяются начальными условиями и, следовательно, остаются одинаковыми в течение всего будущего движения системы; очевидно, что эти константы движения соответствуют консервативным свойствам. Это рассуждение, конечно, можно сразу расширить. Любая система, механическая или нет, движение которой определяется дифференциальными уравнениями, будет обладать определенными консервативными свойствами. Для систем механики энергия является одной из консервативных функций; другими являются импульс и момент импульса. Энергия особенно проста в том смысле, что она связана с измеряемыми свойствами системы простой формулой ($\sum \frac{1}{2} mv^2$) и, кроме того, является скалярной, что также является свойством количества вещества. Но идти дальше и приписывать энергии другие свойства материи, такие как локализация в пространстве, означает полностью упускать из виду существенное различие в характере операции, посредством которой измеряются материя и количество энергии, то есть упускать из виду существенное различие в их физическом характере.

Возможное распространение концепции энергии с механики на термодинамику получает достаточное физическое объяснение с точки зрения наших взглядов на по существу механический характер тепловых явлений. То, что эта идея может быть распространена также на простые электрические или магнитные системы, в которых пренебрегается влиянием скорости распространения, является следствием того факта, что в этих системах уравнения движения остаются того же общего механического типа, поскольку Максвелл показал, что уравнения таких систем могут быть записаны в обобщенной лагранжевой форме. Однако, когда мы распространяем наши формулы на системы, в которых важна скорость распространения (то

есть, когда мы рассматриваем уравнения поля в их общей форме), мы обнаруживаем, что уравнения Лагранжа больше не применимы к материи, взятой самой по себе, и энергия больше не сохраняется в первоначальном смысле. Однако появляется новая функция, которая математически ведет себя так же, как раньше вела себя энергия. Уравнения движения системы остаются лагранжевыми по форме, если механические части системы дополняются электрическими и магнитными полями в пространстве. Таким образом, в этой расширенной форме мы имеем консервативную функцию, как и прежде, и концепция энергии может быть сохранена в этом расширенном аспекте. Однако физические операции, с помощью которых определяется энергия, полностью изменены, и физический характер концепции изменен. Не более, чем ранее, существует оправдание для локализации энергии в пространстве или приписывания ей других свойств материи. И все же материализация концепции энергии и вытекающее из этого желание, чтобы энергия была локализована в пространстве, является для многих самым сильным аргументом в пользу существования медиума.

Таким образом, насколько я могу судить, существование консервативных функций связано с возможностью описания природных явлений дифференциальными уравнениями. То, что, кроме того, существует консервативная функция точной формы, встречающаяся в механике, является следствием особой формы уравнений и природы сил. Вопрос о значении того факта, что силы природы кажутся консервативными по отношению к этой конкретной функции механики, представляет большой интерес, но сейчас это не является нашей непосредственной заботой. Нас скорее интересует вопрос, при каких общих условиях у нас будут консервативные функции. Квантовая теория действительно предполагает, что когда мы переходим к явлениям достаточно малого масштаба, мы, возможно, больше не сможем использовать дифференциальные уравнения в наших описаниях, и, следовательно, предыдущая причина существования констант, связанных с движением, исчезает. Теперь следует сделать одно очевидное замечание по поводу этой более общей ситуации. Всякий раз, когда будущая история системы настолько связана с ее нынешним состоянием, что мы можем вернуться к настоящему из любой будущей конфигурации, у нас всегда будут консервативные функции. Ибо любая будущая конфигурация содержит определенные фиксированные (или консервативные) функции, поскольку мы можем реконструировать уникальное настоящее из любого будущего состояния. Нет никаких оснований ожидать, что операции, с помощью которых мы находим фиксированные объекты, всегда будут простыми, как в механическом случае. Итак, определение будущего настоящим и, наоборот, возможность восстановления настоящего из будущего (или прошлого из настоящего), по нашему убеждению, является свойством, которое по крайней мере приблизительно верно для явлений вплоть до меньшего масштаба, чем тот, которого мы пока достигли, и поэтому мы ожидаем найти эти консервативные функции в системах, конечные законы движения которых гораздо более общие, чем те, с которыми мы пока знакомы. Конкретная форма консервативной функции зависит от характера системы. То, что для обычных систем существует скалярная консервативная функция, зависит, конечно, от конкретных свойств системы, но мы, по крайней мере, готовы обнаружить, что скалярная консервативная функция не обязательно означает дифференциальное уравнение второго порядка.

Потенциальная энергия системы имеет особое значение с этой точки зрения. В обычной механической системе потенциальная энергия просто измеряет работу, сделанную приложенными силами при перемещении из начального положения в конечное; то есть потенциальная энергия является мерой отклонения от начального положения и, таким образом,

измеряет определенную особенность истории системы. В более общей системе, в которой у нас может не быть дифференциальных уравнений, мы можем искать нечто аналогичное потенциальной энергии, которая будет измерять смещение системы от ее начальной конфигурации. Такая мера всегда возможна до тех пор, пока прошлое может быть реконструировано из настоящего (или настоящее из будущего). Мы вспоминаем замечание Пуанкаре[20] о том, что мы по необходимости всегда должны сохранять сохранение, потому что, если у нас есть система, в которой сохранение, по-видимому, терпит неудачу, нам просто нужно изобрести новую форму потенциальной энергии. Очевидно, что это замечание не носит общего характера, оно применимо только к таким системам, как рассматриваемые здесь, в которых прошлое может быть реконструировано из настоящего.

[20]Анри Пуанкаре, "Виссеншафт и гипотеза", переведенный на немецкий Ф. и Л. Линдеманными, Тойбнер, Лейпциг, 1906, глава. VIII.

В последнее время много обсуждается целесообразность на основе определенных квантовых явлений отказаться от сохранения как принципа, применяемого к деталям излучения и поглощения света, сохранив его только в статистическом смысле. Мне кажется, что вопрос здесь в умах физиков всегда был просто вопросом удобства, и что мало кто, если вообще кто-либо, сомневался в конечной применимости принципа Пуанкаре или думал, что мы здесь имеем дело с системой такой большой общности, что прошлое невозможно реконструировать на основе настоящего. Вопрос заключался лишь в том, имеют ли те переменные, в терминах которых определяется потенциальная энергия, достаточно тесную связь с другими вещами, имеющими непосредственное экспериментальное значение, или же в целом сохранение потенциальной энергии представляет не больше проблем, чем оправдано ее удобством, что делает предпочтительным обработку со статистической точки зрения. Однако теперь все это дело более или менее прошлого, потому что с недавним расширением экспериментов Комптона,[21] похоже, у нас есть экспериментальные доказательства справедливости закона сохранения в деталях для элементарных квантовых процессов с соответствующей простой потенциальной энергией.

[21]W. Боте и Х. Гейгер, 2-е издание Phys. 32, 639-663, 1925. А. Х. Комптон, проф. Нац. Акад. соц., II, 303-306, 1925.

Однако, если идти еще глубже, то существуют квантовые явления, которые, возможно, все еще придется рассматривать статистическими методами, а это может означать отказ от сохранения в деталях. Например, у нас нет экспериментальных доказательств того, что делает электрон, перепрыгивая с одной квантовой орбиты на другую. Подобная ситуация просто означает, что те детали, которые определяют будущее в терминах прошлого, могут лежать настолько глубоко в структуре, что в настоящее время у нас нет непосредственных экспериментальных знаний о них, и мы можем в настоящее время быть вынуждены рассматривать их со статистической точки зрения, основанной на соображениях вероятности. Но я полагаю, что никто, за исключением, возможно, Нормана Кэмпбелла,[22] не будет утверждать, что такая ситуация более чем временная, или перестанет искать последствия этих деталей структуры, которые могут быть открыты для экспериментальной проверки.

[22]Норман Кэмпбелл, Время и шанс, филологический журнал. I, 1106-1117, 1926.

Точно так же мы не можем постоянно довольствоваться картиной радиоактивных явлений, которая представляет радиоактивный распад как дело случая.

Общий вывод, к которому приводит все это обсуждение, заключается в том, что энергия, вероятно, не имеет права на фундаментальное положение, которое склонна придавать ей физическая мысль, но что она является более или менее случайным следствием более глубоко укоренившихся свойств, и что характер этих глубоко укоренившихся свойств подвержен лишь самым общим ограничениям, так что из существования какой-либо энергетической функции можно сделать очень мало выводов о природе деталей.

КОНЦЕПЦИИ ТЕРМОДИНАМИКИ

Мы не будем касаться здесь многих технических вопросов, которые являются надлежащей темой трактатов по термодинамике, а попытаемся рассмотреть только некоторые фундаментальные концепции.

Наиболее фундаментальным из них, отличающим термодинамику от более простых дисциплин, вероятно, является теория температуры. По своему происхождению эта концепция, без сомнения, была физиологической, во многом так же, как механическая концепция силы была физиологической. Но точно так же, как концепция силы была уточнена, концепция температуры может быть более или менее отделена от ее грубого значения с точки зрения непосредственного ощущения и ей может быть придан более точный смысл. Эта точность может быть получена с помощью понятия равновесных состояний. Во-первых, у нас есть фундаментальный экспериментальный факт, что когда маленькое тело помещают внутри большой системы, температуру которой мы грубо определяем как сравнительно неизменную с течением времени, маленькое тело очень скоро приобретает устойчивое состояние, то есть оно приходит в равновесие со своим окружением. Теперь у нас есть дополнительный экспериментальный факт, что если маленькое тело А находится в равновесии со своей средой, и тело В также находится в равновесии с той же средой, то состояние А и В не изменится, когда они вступят в контакт друг с другом — то есть А и В находятся в равновесии друг с другом, а также с окружающей средой и, следовательно, по определению, при той же температуре, что и окружающая среда. Температура окружающей среды теперь измеряется в терминах некоторых свойств А и В, которые, как показал грубый опыт, изменяются в зависимости от физиологической температуры А и В. Таким образом, физиологическое понятие температуры становится более точным, поскольку оно связано с физическим феноменом равновесия.

Теперь сразу становится очевидным, что, заявив таким образом без оговорок, мы сказали вещи, которые не являются правдой. В общем случае неверно, что, когда А находится в равновесии с окружающей средой, а В - в равновесии с той же самой средой, А будет находиться в равновесии с В. Предположим, например, что окружающая среда представляет собой поток воды, а А - крошечное водяное колесо, свободно вращающееся в своих подшипниках, и что В - такое же колесо с большим трением. Тогда мы знаем, что В станет теплым и не будет находиться в равновесии с А при соприкосновении с ним. Или мы можем выбрать для А ртутный термометр

с колбой, покрытой замазкой, а для В аналогичный термометр с колбой, покрытой платиной, и мы знаем, что два термометра не будут регистрировать одинаковую температуру в потоке воды. Или, еще проще, мы можем попытаться определить температуру воздуха в нашем саду в любой ясный день с помощью посеребренного и почерневшего термометра; мы знаем, что два термометра будут показывать разные температуры. Следовательно, очевидно, что нам придется гораздо тщательнее определять условия, при которых сохраняется равновесие, если мы хотим придать точное значение концепции температуры.

Во-первых, кажется совершенно очевидным, что нам придется исключить системы, в которых наблюдается крупномасштабное механическое движение; простое понятие температуры неприменимо к системе, движущейся относительно нас. Только когда два термометра А и В движутся с той же скоростью, что и поток, мы имеем тройное равновесие между потоком, А и В. Мы можем сформулировать это по-другому, сказав, что температура движущегося тела должна измеряться термометром, неподвижным относительно тела, но это всего лишь вопрос слов, и, собственно говоря, концепция температуры применима только к определенному аспекту отношения между двумя телами, находящимися во взаимном покое. Мы здесь полностью пренебрегаем вопросами теории относительности, такими, например, как правильный способ корректировки изменения размеров движущихся термометров.

Если теперь тело, температуру которого мы измеряем, не движется с одинаковой скоростью во всех своих частях, мы все равно можем придать значение локальной температуре, разделив тело на части настолько малые, что скорость каждой части по существу одинакова, и измеряя температуру каждой части неподвижным относительно нее термометром. Теперь мы сталкиваемся с вопросом о том, как далеко продвинуть процесс разделения. Предположим, что у нас есть жидкость, движение которой является полностью турбулентным при измерении приборами обычной шкалы магнитуд. Для такой жидкости соблюдаются фундаментальные равновесные пропорции между двумя измеряемыми телами А и В и жидкостью при условии, что тела А и В настолько велики, что движение является полностью турбулентным по шкале их величины. Затем мы можем определить температуру турбулентной жидкости с точки зрения этих крупномасштабных тел. Но мы также можем определить температуру с точки зрения малого масштаба как среднее значение температур, зарегистрированных достаточно маленькими термометрами, каждый из которых движется со скоростью определенной порции жидкости. Эти две температуры, как правило, будут разными, и мы должны более или менее произвольно выбрать ту, которую мы определяем как истинную температуру. Казалось бы, лучше выбрать маломасштабную температуру, потому что существует определенная степень произвольности в определении масштаба, по которому движение должно оцениваться как полностью турбулентное, но, с другой стороны, существуют трудности в определении малого масштаба, потому что турбулентность может становиться все более и более мелкозернистой, пока мы не закончим с движением самих молекул, когда операции, которые придают смысл концепции температуры, безусловно, терпят неудачу. В данном случае молекулярной турбулентности мы возвращаемся к крупномасштабному определению, которое, очевидно, соответствует обычной физической практике.

Таким образом, получается, что концепция температуры - это не однозначная вещь, которую можно применить ко всему опыту, а что она более или менее произвольна и зависит от шкалы наших измерительных приборов. В любом особом случае значение понятия температуры должно быть установлено специальным соглашением. На практике это часто не вызывает

затруднений, поскольку в большинстве случаев нет большого смещения шкалы относительно термометров.

Рассмотрим теперь другой аспект проблемы равновесия, на который указывают термометры с почерневшими и посеребренными на солнце лампочками. Наш общий опыт подсказывает нам, как справиться с этой ситуацией достаточно эффективно для обычных целей. Мы признаем, что радиация нарушает температурное равновесие, и защищаем лампочки термометров от солнечного излучения соответствующими экранами. Но это лишь сводит к минимуму трудности. Ибо экран нагревается солнцем и, в свою очередь, в меньшей степени нагревает своим излучением лампочку термометра внутри. Мы должны признать, что каждое тело, независимо от его температуры, всегда излучает радиацию, так что колба нашего термометра всегда находится в поле излучения. Поначалу это ставит нас в серьезное затруднительное положение относительно всего вопроса о равновесии и значении температуры. Ситуацию спасает экспериментальное наблюдение, что существует определенное поле излучения, которое одинаково воздействует на все термометры, а именно поле внутри бесконечного тела с одинаковой температурой. Логически это снова выглядит как порочный круг, поскольку мы еще не определили, что мы подразумеваем под одной и той же температурой. Но на самом деле мы избегаем круга здесь, как и во многих других физических случаях, с помощью процесса асимптотической аппроксимации. Процедура, возможно, примерно такая: мы обнаруживаем, что если мы экспериментируем со все более крупными телами, изолированными и находящимися на больших расстояниях от других тел, при примерно одинаковой температуре, если судить по грубым физиологическим ощущениям, два термометра, идентичных, за исключением того, что колба одного почернела, а другого посеребрена, регистрируют примерно одинаковую температуру с течением времени и по мере того, как термометры погружаются в тело на большую глубину. На практике, конечно, радиационная непрозрачность большинства тел настолько высока, что эти меры предосторожности против воздействия внешнего излучения обычно могут быть полностью проигнорированы. С другой стороны, при высоких температурах необходимо четко бороться с излучением.

Вывод для нас из этих соображений состоит в том, что функционально концепция температуры связана с концепцией излучения — концепция равновесия температуры строго говоря, никогда не применима в точности; это лишь ограничивающая концепция, применимая, когда поле излучения имеет особый вид, а именно поле абсолютно черного тела.

Несмотря на явное признание, которое мы должны дать излучению при определении температуры, мы обычно полностью упускаем это из виду, размышляя о механизме обычных физических процессов, как, например, когда мы представляем температуру газа как определяемую кинетической энергией его молекул. Я не сомневаюсь, что небрежность такого рода может быть оправдана, но необходимый логический анализ, по-видимому, сложен и включает в себя множество различных видов экспериментов с использованием методов асимптотического приближения, с помощью которых мы устанавливаем существование различных видов физических констант, таких как константы излучения и поглощения, отражения и рассеяния, флуоресценции и теплопроводности. Нам не нужно проводить здесь анализ, но я считаю, что когда-нибудь стоило бы попытаться это сделать. Такой анализ оправдывает столь часто используемый принцип: если тело находится в тепловом равновесии, то различные задействованные процессы, такие как излучение или теплопроводность, взятые по отдельности, также должны находиться в равновесии. Несомненно, если бы наш опыт

ограничивался более высокими температурами, подобными температуре солнца, усвоить это представление о различных механизмах, действующих независимо, было бы сложнее.

Далее мы рассмотрим другое фундаментальное понятие термодинамики - понятие количества тепла. Поначалу мы, возможно, склонны думать об этом как о сравнительно простой концепции, данной непосредственно с точки зрения опыта, но анализ операций, с помощью которых мы измеряем количество тепла, покажет, что ситуация действительно наиболее сложная. Рассмотрим, например, эксперимент Джоуля, в котором механический эквивалент тепла измерялся путем определения повышения температуры воды в контейнере при перемешивании лопастями, приводимыми в движение падающим грузом. Мы не подвергаем сомнению, что повышение температуры воды происходит из-за механической работы, выполняемой лопастями. Но как насчет повышения температуры контейнера? Мы, несомненно, скажем, что частично этот подъем происходит за счет тепла, передаваемого ему более теплой водой, находящейся в контакте с ним, а частично за счет механической работы, производимой на него турбулентным воздействием воды. Но с помощью каких операций мы должны измерить, какая часть энергии, передаваемой в контейнер, является теплом, а какая - механической работой? Мы попытаемся дать идеализированный ответ на этот вопрос в терминах демонов Максвелла, размещенных на всех участках границы содержащегося сосуда с помощью малогабаритных измерительных приборов. Чтобы измерить поступающее тепло в любой точке, я не вижу ничего другого, что могли бы сделать наблюдатели—лилипуты, кроме как определить градиент температуры в каждой точке границы на основе температурных наблюдений на двух разных уровнях и рассчитать приток тепла от градиента и теплопроводность материала стен - кажется, нет способа измерить поток тепла как таковой. Приток механической энергии должен быть рассчитан на основе детального знания упругих волн и других крупномасштабных деформаций стен. И здесь в нашей процедуре снова присутствует элемент произвола; если наши механические измерительные приборы имеют слишком большой масштаб, мы можем упустить механическую энергию, которую уловили бы более тонкими приборами.

Эта ситуация, которую мы только что подвергли детальному анализу, я полагаю, типична для общей ситуации; в общем случае невозможно найти что-либо, что мы могли бы назвать теплом как таковым. Без дальнейшего детального изучения мы можем однозначно говорить о том, что тело теряет или набирает тепло только тогда, когда не было никакого другого обмена энергией с другими телами. В таком случае тепло измеряется в терминах изменения температуры тела. Концепция тепла в общем случае представляет собой своего рода концепцию мусорной корзины, определяемую негативно в терминах энергии, оставшейся после использования всех других форм энергии.

Существенный факт, что количество тепла само по себе может быть определено только в терминах падения температуры, несколько затемняется обычным методом термодинамического анализа. При описании двигателя Карно, например, указано, что двигатель должен работать между источником и стоком такой величины, чтобы их температура не изменялась за счет выделяемого или поглощаемого ими тепла, так что естественно создается впечатление, что тепло можно каким-то образом измерить отдельно от изменений температуры. Это, конечно, не так; мы просто требуем, чтобы источник и поглотитель были настолько большими, чтобы изменения их температуры отличались по порядку величины от изменений в самом рабочем веществе, чтобы по отношению к рабочему веществу можно было считать, что источник и поглотитель имеют постоянную температуру.

Предполагая теперь, что мы можем измерить количество тепла в тех случаях, когда это понятие имеет смысл, давайте рассмотрим первый закон термодинамики, который мы запишем в виде:

$$dQ + dW = dE$$

Здесь dQ - тепло, передаваемое данному телу другими телами, dW - всевозможная работа, выполняемая над ним извне, а dE - увеличение внутренней энергии. Теперь, если это уравнение говорит то, что кажется на наивный первый взгляд, оно должно сказать, что мы экспериментально находим, что записанное соотношение всегда выполняется между измеренными величинами dQ , dW и dE . Мы видели, что в общем случае невозможно присвоить уникальное операционное значение dQ и dW , и, по-видимому, не их сумме. В настоящее время мы игнорируем трудности такого рода и ограничиваем внимание на dE ; как мы будем его измерять? Я полагаю, что не требуется много исследований, чтобы убедить нас в том, что не существует физических операций для измерения dE как таковых, и что, следовательно, уравнение, выражающее первый закон, должно иметь значение, отличное от того, которое появляется на поверхности. Это часто признается в утверждении, что суть первого закона заключается в том, что dE является точным дифференциалом, определяемым только переменными, которые фиксируют внутреннее состояние тела, а не функцией пути, по которому тело переносится из одного состояния в другое. Но что мы должны понимать под внутренним состоянием и как мы можем быть уверены, что нашли все переменные, необходимые для его полного определения? Внутреннее состояние может быть очень сложной вещью и требовать множества переменных, о чем свидетельствует кусок железа со сложной магнитной историей или кусок алюминия, который вот-вот подвергнется перекристаллизации после перенапряжения. И здесь я снова полагаю, что не существует физической процедуры, с помощью которой этому понятию внутреннего состояния можно было бы придать общий смысл. В конкретных случаях мы можем указать, какие переменные определяют внутреннее состояние, и критерием того, что мы нашли правильные внутренние переменные, является то, что dE должен быть полный дифференциал по ним. Правильно понятый первый закон термодинамики вовсе не утверждает, что энергия сохраняется, поскольку концепция энергии без сохранения бессмысленна. Суть первого закона содержится в утверждении, что концепция энергии существует (или имеет значение с точки зрения операций).

Первый закон часто считается одним из самых общих в физике, но в парадоксальном смысле он является самым специальным из всех законов, потому что понятию энергии нельзя придать никакого общего значения, а только конкретное значение в особых случаях. Своей полной общностью первый закон обязан тому факту, что до сих пор не было обнаружено ни одного конкретного случая настолько широкого характера, чтобы его нельзя было отнести к тому или иному особому случаю.

Изучение сразу же подтвердит эту точку зрения. Таким образом, мы находим великое множество систем, которые адекватно описываются в терминах двух переменных, давления и температуры, поскольку функция θ и t может быть найдена такой, что ее дифференциал равен $dQ + dW$. Существуют и другие системы, в которых шесть компонентов стресса и t полностью фиксируют внутреннее состояние в том смысле, что они определяют dE . В других системах может потребоваться определение магнитного поля, электрического или гравитационного поля. Не известно ни одного случая, который нельзя было бы уладить с точки зрения действия

внешних сил надлежащего рода, но общей процедуры не существует, и первый закон обязан своей общностью исчерпывающему каталогизированию особых случаев.

Теперь мы можем вернуться к оставленному выше вопросу о двусмысленности в $dQ + dW$. Во всех случаях, когда можно найти конкретные переменные, которые определяют dE , dQ и dW также имеют значение. Рассмотрим, например, газ, внутреннее состояние которого может быть охарактеризовано в терминах t и p . Сам факт того, что внутреннее состояние может быть задано в терминах двух переменных, одна из которых является механической переменной, показывает, что вещество механически однородно. Будучи механически однородными, у нас нет возможности неоднозначного изменения значений dW в зависимости от шкалы измерительных приборов, и фактически мы знаем, что $dW = p dv$. Аналогично, газ, являющийся однородным и находящимся в состоянии покоя в целом, допускает уникальные значения для dQ . Конечно, это не может заслонить физический факт, что даже в таком газе, когда мы переходим к достаточно малому масштабу, мы обнаруживаем неоднородности, возникающие в результате броуновского движения и т.д. Практически наше утверждение означает, что неоднородности настолько мелкозернисты, что в очень широком диапазоне масштабов измерительных приборов мы получаем одни и те же определенные результаты. Соображения того же рода применимы к более сложным системам. Если dE представляет собой полную разницу в показателях t и шести составляющих напряжения, это снова означает, что тело однородно, его состояние определяется температурой и напряжением, которые одинаковы по всему телу, и, опять же, нет никакой возможной двусмысленности из-за шкалы приборов, которые измеряют dW и dQ . Таким образом, в целом кажется, что если тело допускает операции, посредством которых dE приобретает смысл, то в то же время предусмотрены dQ и dW . При проработке этой идеи во всех деталях необходимо уделить некоторое внимание вопросу порядка дифференциалов. dQ для единицы времени и единицы объема строго равен $k\nabla^2 t$, где k - теплопроводность, так что при определении dQ используются вторые производные температуры.

Если тело явно неоднородно, все равно опыт показывает, что его можно разделить на небольшие части, каждая из которых сама по себе достаточно однородна, и первый закон в его обычной форме может быть применен к каждой из частей.

Наконец, мы подчеркиваем факт, уже неявно упомянутый, а именно, что потоку тепла нельзя непосредственно придать никакого физического значения, и не существует операций для его измерения. Все, что мы можем измерить, - это распределение температуры и скорость ее повышения. Как определено в настоящее время, тепловой ток является чистым изобретением, не имеющим физической реальности, поскольку любой определенный тепловой поток всегда может быть изменен путем добавления соленоидального вектора с изменением, не поддающимся измерению. Если кто-то утверждает, что во всем пространстве существует равномерный тепловой поток 10^6 кал . / см.² секунды в направлении Полярной Звезды, опровергнуть это невозможно, поскольку такой поток является соленоидальным, и от каждой замкнутой поверхности в единицу времени отходит столько тепла, сколько поступает внутрь. Такой соленоидальный поток не имеет смысла с точки зрения операций; мы могли бы придать смысл такому потоку только с точки зрения некоторой незначительной модификации соленоидального состояния, вводимого измерительным прибором. Во всех обычных условиях поток тепла, заданный простым соотношением $q = k \text{ Град } t$, в точности соответствует тому, что наши атомные картины позволяют ожидать в тех случаях, когда детали картины могут быть проработаны. Но могут быть случаи, когда выгодно дополнить обычный тепловой поток ($= k \text{ Град}$

t) чистой фикцией соленоидального потока, потому что таким образом может оказаться возможным объяснить новые явления, которые возникают при незначительном отклонении от соленоидальных условий. Таким образом, если в проводнике с равномерной температурой, по которому проходит постоянный электрический ток, мы говорим, что тепловой ток также протекает пропорционально электрическому току и, следовательно, соленоидально, мы можем обеспечить возможность простой корреляции явлений, обнаруживаемых в тех более сложных условиях, когда электрический ток протекает в проводнике с неоднородной температурой в магнитном поле. Если окажется, что тепловой ток *однозначно* определяется соображениями такого характера, то мы сделали первый шаг в сторону от чистого формализма, которым в противном случае являются такого рода вещи, в направлении придания физической реальности изобретению "теплого тока".

Существуют и другие интересные вопросы фундаментального термодинамического характера, такие, например, как, имеет ли концепция энтропии какое-либо общее значение, помимо шкалы наших измерительных приборов, и каково практическое значение применения термодинамических концепций к излучению, но мы не будем рассматривать эти вопросы здесь.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ

Теперь мы ставим перед собой задачу найти значение различных концепций, в терминах которых мы описываем поведение электрических систем, предполагая, что мы понимаем, что мы подразумеваем под "электрическими". Мы начинаем с простейших электрических систем, а именно с тех, в которых мы имеем дело со статическими явлениями в больших масштабах. В таких системах существуют независимые физические операции, с помощью которых мы можем определить величину любого заряда при условии, что он эффективно сосредоточен в геометрической точке. Измерения, связанные с этими операциями, являются измерениями обычных механических сил; мы предполагаем, что наши знания механики уже научили нас производить такие измерения. Электрически заряженное тело испытывает силы, которые можно измерить, привязав к нему веревку и натянув ее с помощью пружинных весов достаточно сильно, чтобы удерживать тело в равновесии. Три заряда численно равны, если при размещении каждого на единичном расстоянии от другого, в отсутствие третьего (или другого заряда), силы всегда одинаковы. Кроме того, если силы имеют единичную величину, то заряды определяются как единичный заряд. Получив единичный заряд, мы определяем величину любого другого заряда как равную силе, которую он испытывает при размещении на единичном расстоянии от единичного заряда. Конечно, все это очень банально; для нас важно лишь то, что величина заряда, или количество электричества, является независимым физическим понятием и что для его определения существуют уникальные операции. Эти операции предполагают способность выполнять определенные механические операции. Теперь, научившись измерять электрические величины, мы экспериментально обнаруживаем закон силы, обратный квадрату, а позже приходим к концепции электрического поля. Как мы видели, поле - это изобретение; здесь мы будем использовать это понятие только для той цели, для которой было сделано изобретение, и не будем вдаваться ни в какие следствия приписывания полю физической

реальности. Обратите внимание, что до тех пор, пока мы имеем дело только с точечными зарядами, нам не нужно определять напряженность поля в терминах предельной процедуры уменьшения исследующего заряда, поскольку предельно малый заряд необходим только для того, чтобы избежать реакции исследующего заряда на положения зарядов, которые генерируют поле. Все это опять же банально; важным моментом является то, что операции, с помощью которых устанавливаются закон обратных квадратов и концепция поля, предполагают, что заряд задается как независимое понятие, поскольку операции предполагают знание зарядов. Операции также включают измерение усилий с помощью обычной *статической* процедуры механики с помощью пружинных балансиров. С помощью имеющихся в нашем распоряжении средств мы устанавливаем одно очень важное свойство электрических зарядов, а именно, что общая величина заряда на изолированном теле конечного размера сохраняется, независимо от того, как заряд вынужден перестраиваться из-за движения зарядов на соседних телах.

С помощью процедур, точно подобных описанным выше, мы можем обрабатывать все соответствующие магнитные величины; существует формальный параллелизм между двумя наборами явлений, но есть физическое различие, заключающееся в том, что мы должны создать единый магнитный полюс с помощью устройства, использующего очень длинный тонкий магнит.

Теперь мы даем нашей электрической системе больше свободы, позволяя зарядам находиться в движении относительно друг друга. Возможно, самый насущный вопрос, который мы сейчас должны задать, заключается в том, продолжает ли сохраняться заряд при приведении в движение, или же общий заряд изолированного тела является функцией его скорости? Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны обобщить процедуру, с помощью которой мы присвоили числовое значение стационарному заряду. Возможно, самый простой способ - позволить двум единичным зарядам двигаться с постоянной скоростью, оставаясь на единичном расстоянии друг от друга, и измерить с помощью пружинных весов силу, необходимую для удержания их на постоянном расстоянии друг от друга. Теперь мы сразу обнаруживаем, что сила изменяется при этих условиях, так что нашим первым побуждением является сказать, что заряд является функцией скорости. Но по мере дальнейшего эксперимента мы обнаруживаем, что положение дел очень сложное; сила, действующая между двумя зарядами в любой момент их движения, зависит не только от зарядов, их расстояния друг от друга и их скоростей, но также от угла между соединяющей их линией и направлением движения линий. Дальнейшие эксперименты другого рода дают другую информацию; требуется сила для поддержания заряда в равномерном движении в магнитном поле или для поддержания магнитного полюса в движении в электрическом поле. Движущийся электрический заряд оказывает воздействие на неподвижный магнитный полюс, так что по определению движущийся заряд окружен магнитным полем, и аналогично движущийся магнитный полюс окружен электрическим полем. Возвращаясь к нашим двум движущимся электрическим зарядам, мы вынуждены спросить, является ли, если все эти сложности возможны, числовая константа (единица для статических зарядов) в законе силы, обратном квадрату, функцией скорости, а также величины самих зарядов? Если мы расширим вопрос таким образом, как, по-видимому, и должны, наша проблема становится неопределенной, поскольку мы пытаемся ответить на два разных вопроса с помощью одного вида измерения, а именно силы между движущимися зарядами. Мне не повезло с опробованием других методов измерения. Очевидно, не существует операций, с помощью которых можно было бы придать однозначный смысл вопросу о том, зависит ли

величина заряда от его скорости. Осознав эту ситуацию, мы сначала испытываем смущение, не зная, как поступить дальше, но потом осознаем, что это смущение вызвано не нами самими, а соответствует физическому факту. Концепция заряда как уникальной и независимой вещи, по существу, относится только к статическим системам. Мы можем распространить эту концепцию на движущиеся системы, если пожелаем, для собственного удобства, но должны признать, что такое расширение является нашим изобретением, а не реальностью природы. Теперь мы действительно делаем такое расширение, и делаем это самым простым из возможных способов, то есть определяем заряд на изолированном движущемся теле как тот, который мы должны были бы найти на нем, если бы привели его в состояние покоя и произвели измерения в соответствии с обычной статической процедурой. То, что это удобно делать, зависит от экспериментального результата, согласно которому найденный таким образом заряд не зависит от способа, которым телу сообщается скорость или отводится от него; другими словами, всякий раз, когда тело приводится в состояние покоя, на нем всегда обнаруживается один и тот же заряд.

Хотя это чистое определение с нашей стороны, оказывается, что оно имеет наиболее простую и удобную связь с экспериментальными фактами, которые были обнаружены после того, как было принято решение рассматривать движущийся заряд таким образом; речь идет об атомной структуре электричества. Если тогда мы согласимся называть каждый элементарный заряд постоянной величиной, не зависящей от скорости, общий заряд тела становится просто пропорциональным подсчету общего числа атомных зарядов на теле, что, безусловно, очень удобно и наводит на размышления.

Установив теперь, что мы подразумеваем под величиной движущегося заряда, мы готовы перейти к общей проблеме поведения любой системы заряженных тел в движении. В настоящее время мы рассматриваем только явления масштаба повседневного опыта. Наиболее общая проблема, имеющая здесь значение, заключается в определении всех измеримых свойств системы в терминах тех данных, которые, как показывает эксперимент, могут быть заданы произвольно. Итак, мы уже подчеркивали, что электромагнитное поле само по себе является изобретением и никогда не подлежит непосредственному наблюдению. То, что мы наблюдаем, - это материальные тела, с зарядами или без них (включая, в конечном счете, электроны этой категории), их положения, движения и силы, которым они подвержены. Силы должны измеряться в соответствии с определением в механических терминах, либо по напряжениям в элементах каркаса, если система находится в равновесии, либо в терминах ускорений и масс, если она не находится в равновесии. Электромагнитное поле как таковое не является конечным объектом наших расчетов, но его вычисление является лишь промежуточным вспомогательным шагом, который удобно выполнять, потому что наша математическая формулировка дает настолько простую связь между электромагнитным полем, зарядами и механическим воздействием, что последнее может быть вычислено сразу в терминах первого. На самом деле связь настолько проста, что во многих случаях мы стали считать нашу проблему решенной, если сможем вычислить электромагнитное поле, упуская из виду тот факт, что поле не имеет непосредственного значения с точки зрения опыта.

Электромагнитная теория теперь представляет нам решение общей проблемы; это решение содержится в уравнениях четырех полей Максвелла, определяющих уравнениях и тех дополнительных уравнениях (довольно часто упускаемых из виду), которые описывают силы, действующие полем на электрические заряды, или токи, или диэлектрики. Давайте спросим,

как мы можем приступить к проверке физической корректности этих уравнений. Мы можем начать с одного из простейших возможных тестов и выяснить, верны ли уравнения, утверждающие, что сила, действующая на заряд, движущийся в электрическом поле, является просто произведением заряда и напряженности поля. На первый взгляд, это удивительное утверждение. На само поле влияет движение зарядов, которые его генерируют, и естественно ожидать обратного эффекта. Более того, если мы разделяем точку зрения медиума, легко подумать, что независимо от того, что находится в среде, которая захватывает заряд и оказывает на него силу, будет труднее закрепиться, когда заряд находится в движении.

При попытке экспериментально проверить наше утверждение единственное дополнительное усложнение по сравнению со статическим случаем, который мы уже проверили, возникает из-за движения заряда, поскольку мы определили величину движущегося заряда, поэтому здесь нет никаких трудностей, и мы можем, кроме того, предположить, что поле генерируется стационарными зарядами, так что нам не нужно беспокоиться о том, применима ли здесь процедура, с помощью которой поле было первоначально определено. Задача проверки уравнения сводится к простой физической задаче измерения силы, действующей на движущийся заряд. Как нам это сделать? Если скорость невелика, мы можем привязать к заряду бечевку и измерить силу с помощью пружинных весов (или их эквивалента). Но теперь изучение уравнений показывает, что в более сложных явлениях заметных отклонений от статического поведения следует ожидать только при гораздо более высоких скоростях, чем это может быть достигнуто при буксировке зарядов с помощью струны и пружинных весов, так что очевидно, что необходимо проверить простое уравнение для силы, действующей на движущийся заряд, также и при высокой скорости. Поскольку при высокой скорости метод измерения силы с помощью пружинных весов терпит неудачу, мы вынуждены прибегать к единственной имеющейся у нас процедуре, а именно к измерению в терминах результирующего ускорения, вычисляя силу по первому закону механики Ньютона. Но это предполагает знание массы движущегося тела, которая, как мы понимаем, в целом может быть функцией скорости. Итак, мы уже видели при обсуждении концепций механики, что операции, с помощью которых определяется механическая масса, не могут выполняться на высоких скоростях, так что либо концепция механической массы становится бессмысленной при высоких скоростях, либо мы должны принять другое определение. Пытаясь дать это новое определение массы при высоких скоростях, мы приходим к результату специальной теории относительности, а именно к тому, что вся масса, механическая или электрическая, должна быть одинаковой функцией скорости. Если теперь электрическую массу можно определить в терминах скорости, то наша непосредственная проблема решена, и мы сможем завершить экспериментальную проверку уравнения. Но на самом деле, чтобы определить электрическую массу, мы должны использовать то уравнение, которое мы сейчас пытаемся установить. Логически мы снова имеем порочный круг, физическое значение которого заключается в том, что не существует независимых операций для придания уникального значения концепции силы, действующей на заряд с высокой скоростью.

Минуту назад мы казались так близки к нашей цели, что можем позволить себе перепрыгнуть логическую пропасть и предположить, что уравнение верное. Электрическая масса теперь становится определенной функцией скорости, механическая масса - той же функцией, и мы можем сравнить фактическое ускорение, получаемое зарядом в поле, с ускорением, рассчитанным по уравнению. Наше убеждение, основанное на всем опыте, накопленном до настоящего времени, состоит в том, что эти два ускорения будут согласованы.

Таким образом, уравнение каким-то образом имеет правильную связь с опытом в том смысле, что следствие из уравнения может быть проверено экспериментально, несмотря на то, что в нынешнем виде уравнение бессмысленно, поскольку не существует операций, с помощью которых отдельным терминам можно придать значение. При низких скоростях уравнение действительно говорит то, что оно, кажется, говорит, потому что отдельные термины имеют значение с точки зрения операций; и, более того, то, что говорит уравнение, согласуется с экспериментом. При высоких скоростях уравнение вообще не означает того, что появляется на поверхности; само по себе оно не имеет смысла; оно имеет смысл только тогда, когда рассматривается как член системы уравнений, и только в той мере, в какой система уравнений косвенно делает утверждения о природе, которые имеют смысл с точки зрения операций, которые могут быть выполнены физически. Отдельные члены уравнения системы не имеют значения при высоких скоростях, и на самом деле членов больше, чем независимых физических операций.

Точный анализ с оперативной точки зрения значимости уравнений при высоких скоростях, возможно, никогда не проводился и не является необходимым для нашей непосредственной цели. Обсуждение показало, однако, что количество физически независимых понятий сократилось по крайней мере на два, поскольку мы дали чисто формальные определения значения количества электричества и силы, действующей полем на заряд с высокой скоростью. Нет никаких оснований думать, что в этом анализе есть что-то уникальное или что формальные определения, возможно, не были даны другим понятиям, кроме заряда и силы. Мы можем только констатировать, что с точки зрения физического содержания уравнения имеют по крайней мере две степени свободы. Тогда должно быть возможно найти совершенно разные типы уравнений, которые одинаково хорошо согласуются с опытом. В частности, поскольку мы видели, что сила, действующая на движущийся заряд, не имеет значения с точки зрения независимых операций, должно быть возможно с помощью произвольного определения сделать эту силу любой функцией скорости, какую нам заблагорассудится (конечно, уменьшив до надлежащего значения при малых скоростях), а затем определить другие уравнения так, чтобы вся группа уравнений соответствовала эксперименту. Насколько я знаю, никто не пытался дать такой модифицированный набор уравнений, и действительно, нет особой причины, по которой кто-либо должен утруждать себя этим, потому что существующие уравнения достаточно просты, и модифицированные уравнения, хотя, возможно, и сильно отличаются по внешнему виду от существующих, не имели бы никакого преимущества в каком-либо большем или ином физическом содержании.

Но нет никаких оснований думать, что нынешнее положение дел будет сохраняться всегда. Мы видели, что уменьшение числа концепций соответствует нашей неспособности измерять столько же видов физических явлений при высоких скоростях, сколько и при низких. Теперь задача будущего экспериментатора - настолько усовершенствовать возможности измерения при высоких скоростях, чтобы восстановить эти две степени свободы. В частности, масса должна быть измерена в механических терминах при высоких скоростях. Когда это восстановление будет произведено, и все величины в наших уравнениях получат независимый физический смысл, значение уравнений с точки зрения операций сильно изменится, хотя формальный вид останется неизменным. Затем мы должны быть готовы к обнаружению, как всегда, когда мы меняем диапазон явлений, что уравнения в их нынешней форме вообще не соответствуют фактам, и что одна из альтернативных форм, допускаемых нашими нынешними двумя степенями свободы, является правильной формой. Но пока не получены новые

экспериментальные факты, вряд ли стоит пытаться определить вдвойне бесконечное разнообразие форм, которые уравнения могли бы иметь в соответствии с данным экспериментом.[23]

[23]С тех пор, как это было написано, появилась статья В. Буша, журнал. из математики. и Phys., том V., № 3, 1926, в котором показано, что есть преимущества в предположении изменения заряда электрона при его приведении в движение.

До сих пор мы обсуждали распространение обычных электрических явлений только в одном направлении - на высокие скорости. Существует другое расширение, которое является гораздо более важным физически, а именно для очень малых масштабов величины. Это расширение необходимо для понимания свойств материи в целом, поскольку электрическая природа атома была однажды установлена. Наша задача состоит в том, чтобы показать, как статистическое среднее значение поведения большого числа электронов дает крупномасштабные эффекты, которые находятся в пределах досягаемости наблюдения и которые описываются уравнениями, которые мы только что обсудили. Чтобы получить это среднее статистическое значение, мы должны уметь вычислять по крайней мере определенные особенности поведения отдельных электронов, а это значит, что мы должны знать форму уравнений вплоть до размеров порядка размеров электрона или меньше. Теперь, если кто-то сопоставит масштаб предполагаемых размеров электрона с наименьшими размерами, на которых мы можем провести независимую экспериментальную проверку этих уравнений, он должен признать, что существует огромная вероятность изменения типа уравнения за пределами предела, которого мы можем достичь прямым экспериментом, и шансы угадать правильное расширение уравнения до малых размеров, соответственно, почти исчезающе малы. (Возможно, мы можем сказать, что эксперименты по броуновскому движению в масштабе большого количества атомов в диаметре приближают нас непосредственно к возможному, что означает, что мы в 10^6 или 10^7 раз далеки от электронных измерений.) Однако, несмотря на кажущиеся огромными шансы против этого, эта программа расширения уравнений поля до малых размеров и прослеживания последствий была именно той программой, которую поставил перед собой Лоренц.[24] То, что Лоренц увидел, что такая программа может быть реализована, должно быть признано видением экстраординарного гения, и то, что он был готов посвятить ей годы трудных и детальных расчетов, которые он проводил, свидетельствует о постоянстве цели высшего морального порядка.

[24]Смотрите, например, Х. А. Лоренц, Теория электронов, Б. Г. Тойбнер, 1916.

Теперь мы должны критически изучить эту программу и выяснить, каково значение показателя успеха, которого достиг Лоренц. Точное расширение уравнений, которые он составил, было очень простым, поскольку крупномасштабные уравнения Максвелла были заменены с минимальными изменениями, насколько это было возможно. Уравнения настолько знакомы, что нам нет необходимости записывать их подробно; они выражают отношения между векторами электрической и магнитной силы (сила и индукция теперь становятся одним и тем же, разница между ними в весовых телах является одной из вещей, которые следует объяснить в терминах электронов), пространственной плотностью электрического заряда, его скоростью и силой, действующей на элементарный заряд. Мы должны заметить, что, хотя формально уравнения мало изменились по внешнему виду, тем не менее физическое содержание, судя по

операциям, сильно изменилось. Рассмотрим, например, значение плотности заряда. В уравнениях Максвелла ρ было просто количеством дискретных элементарных зарядов на единицу объема, причем расстояния между этими зарядами предполагались настолько малыми по сравнению с масштабом задействованных явлений, что их средний эффект мог быть справедливо представлен в терминах их количества. В уравнениях Лоренца, с другой стороны, ρ имеет значение, отличное от 0, только внутри электрона; везде еще $\rho = 0$. Теперь анализ предыдущего обсуждения, в котором мы задавались вопросом, может ли величина заряда зависеть от его скорости, покажет, что не существует никаких физических операций, каких бы то ни было, с помощью которых можно было бы придать значение ρ в отдельных точках внутри электрона. Есть одно условие, на этот ρ , а именно, что ее интеграл по всей общем объеме присвоенных электронов должна быть равна общей статического заряда электрона. Очевидно, что единственное скалярное условие - это довольно грубый инструмент, с помощью которого можно попытаться определить точечную функцию по всему объему. Опять же, уравнения говорят о скорости заряда во внутренних точках электрона; какие существуют возможные физические операции, с помощью которых можно придать значение скорости аморфного бесструктурного вещества в областях, недоступных эксперименту? Здесь снова концепция как подробное описание поведения в точке стала бессмысленной, и снова существует единственное интегральное условие, а именно, что v , связанное с каждым ρ , должно быть таким, чтобы при интегрировании по объему электрона это давало общий перенос заряда, равный тому, который переносит электрон при своем движении. Это снова единственное условие для функции, распределенной в пространстве. Опять же, уравнения содержат электрические и магнитные векторы в точках внутри электрона. Каково возможное значение этих векторов поля с точки зрения операций? Наша процедура нахождения поля в точке по определению предполагает нахождение силы, действующей на электрический заряд, размещенный в этой точке. Но нет заряда меньше электрона, и процедура вырождается в фикцию. Опять же, существует единственное интегральное условие для векторов поля; интеграл силы от предполагаемой плотности заряда, взятый по общему объему электрона, должен давать значение, соответствующее эксперименту. За исключением этого единственного условия, концепция поля в точках внутри электрона является изобретением, не имеющим физической реальности. Концепция поля бессмысленна не только в точках внутри электрона, но и в точках снаружи на определенном расстоянии, потому что исследующий заряд никогда не может быть меньше самого электрона и, следовательно, никогда не может приблизиться к нему ближе, чем на определенное расстояние.

Реальное положение дел намного хуже, чем уже представлялось. При обсуждении пространства и времени было показано, что столь малым длинам и временам, какие должны быть приняты при описании поведения отдельных электронов, нельзя придавать никакого независимого физического значения. Операции Div , Curl , d/dt , которые входят в уравнения поля, следовательно, физически бессмысленны в их нынешнем виде; они имеют только математический смысл, который начинает приобретать физическую окраску самым сложным образом, когда уравнения интегрируются по достаточно большим объемам.

Следовательно, очевидно, что понятия, входящие в уравнения поля, полностью утратили свое масштабное значение; они стали размытыми, слитыми воедино и их стало меньше в количестве. Точный анализ этой ситуации, вероятно, никогда не предпринимался и, очевидно, был бы затруднен: было бы интересно узнать, по крайней мере, сколько действительно независимых концепций существует для явлений такого порядка. Вероятно, стоило бы

предпринять попытку анализа с физической точки зрения, предложив возможные эксперименты, с помощью которых можно было бы расширить число физически независимых концепций.

Поскольку величины в полевых уравнениях не имеют смысла в том голом виде, в котором они входят в уравнения, бессмысленно спрашивать, верны ли уравнения в их нынешнем виде или нет. При нашем нынешнем уровне экспериментальных знаний также бессмысленно спрашивать, сохраняется ли, например, закон обратных квадратов между электрическими зарядами или излучается ускоренный заряд. Эти вопросы имеют смысл только тогда, когда применяются к явлениям в масштабе, достаточно большом, чтобы соответствовать возможному эксперименту.

У утверждения о том, что бессмысленно спрашивать, истинны ли уравнения поля, есть довольно интересная обратная сторона, а именно, что, возможно, не лишено смысла утверждать, что они ложны. Утверждение не является истинным, если оно не истинно в каждой частности, но оно ложно, если оно ложно в какой-то одной частности. Если мы можем показать, что единственное следствие из уравнений поля Лоренца, проинтегрированное или усредненное таким образом, чтобы соответствовать экспериментальным возможностям, является ложным, тогда уравнения должны быть ложными. Похоже, что, рассматриваемые как полное описание физического поведения в малом масштабе, уравнения следует признать ложными, поскольку они не содержат никаких намеков на квантовые явления.

Даже если нам придется признать, что уравнения ложны, не может быть никаких сомнений в том, что они соответствуют важной части реальности и что они оказали величайшую услугу физике. Каково значение успеха, которого они достигли? Следует отметить, что все явления, к которым были успешно применены уравнения Лоренца, хотя и не являются крупномасштабными явлениями в обычном смысле этого слова, тем не менее являются явлениями, включающими взаимодействие ряда атомов, и что уравнения, несомненно, терпят неудачу при применении к явлениям с участием одиночных электронов. Из наших лучших имеющихся доказательств следует, что в малом масштабе поведение природы управляется квантовыми принципами и, следовательно, сильно отличается от крупномасштабного поведения, которое, как мы видели, управляется уравнениями Максвелла. Конечно, должна существовать переходная зона, в которой характер явлений меняется от квантового к максвелловскому. Теперь любая программа, подобная программе Лоренца, почти неизбежно начнет давать правильные результаты, когда мы достигнем переходной зоны, по той простой причине, что соотношения Максвелла были введены в уравнения и всегда готовы появиться, как только квантовые соотношения начнут уступать место. Физическое значение успеха программы Лоренца, по-видимому, заключается в том, что переход от Максвелла к кванту происходит на стадии, довольно далекой от отдельных атомов. Поиск точных деталей перехода от максвелловских явлений к квантовым составляет большую часть программы ближайшего будущего.

Весь этот скептицизм по отношению к классической работе Лоренца, вероятно, будет скорее раздражающим или удручающим, особенно если попытаться представить, какой другой курс можно было бы избрать. Действительно, кажется, что мы оказались в настоящем затруднительном положении; Лоренц был практически вынужден из-за характера математических инструментов, которыми он располагал, следовать тем курсом, которым он

следовал, несмотря на любое признание физической бессмысленности математических операций. Мы уже видели, что традиционная математика не соответствует физической реальности; она не может легко сформулировать квалифицированное утверждение, подчиненное ограничениям, и она не признает разницы между физически большим и физически малым и соответствующим изменением операционного значения их символов. Она начинается с того, что становится самым полезным слугой, когда имеешь дело с явлениями обычного масштаба, но заканчивается тем, что волей-неволей тащит нас за шиворот внутрь электрона, где заставляет повторять бессмысленную тарабарщину. Лармор понимал это и в своей электронной теории, разработанной практически одновременно с теорией Лоренца, попытался рассматривать электроны как единое целое, а не делать бессмысленных заявлений об их внутренней стороне.^[25] Но он был гораздо менее успешен, чем Лоренц, в том, чтобы его анализ давал физические результаты, и можно подозревать, что это было, по крайней мере частично, из-за трудностей с его инструментами.

^[25]Джозеф Лармор, *Эфир и материя*, Кембриджский университет, издательство, 1900. В этой книге электрон рассматривается как точечная сингулярность в эфире.

То, что мы хотели бы уметь делать, легко увидеть. То, что входит в наши уравнения, должно иметь независимый физический смысл, и характер нашей математической формулировки должен меняться, чтобы идти в ногу с изменением физических операций, которые придают смысл терминам. Например, электрическая плотность имеет значение для крупномасштабных явлений, но ничего не значит в малом масштабе. Нашей конечной электрической единицей является электрон; когда мы переходим к этой шкале величин, наша математика должна делать заявления об относительном поведении дискретных электронов и не упоминать даже косвенно плотность в точках внутри электрона. Но такого рода вещи мы, по-видимому, пока не можем сделать; надлежащий математический язык еще не разработан. Такой язык, когда он будет разработан, должен не только быть способен противостоять искушению проникнуть внутрь электрона, но также должен попытаться обойтись без концепции поля, которая, как мы видели, подвержена столь многочисленным физическим злоупотреблениям, и должен сводить эффекты в сложных электрических системах к конечным элементам, имеющим физическое значение, а именно к двойному действию между парами электрических зарядов, без каких-либо последствий для физического действия там, где зарядов нет.

ПРИРОДА СВЕТА И КОНЦЕПЦИИ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Мы уже обсуждали несколько аспектов теории относительности в связи с отношением к ней некоторых наших фундаментальных концепций. Есть еще другие темы, связанные с теорией относительности, которые требуют внимания; большинство из них связаны со свойствами света. Теперь будет удобно обсудить вместе свойства света и эти концепции относительности. Мы ограничиваем наше обсуждение света теми простыми свойствами, которые имеют отношение к теории относительности.

Практически все наши размышления об оптических явлениях делаются в терминах изобретения, посредством которого эти явления уподобляются явлениям обычного механического опыта, и поэтому их становится легче обдумывать. Чтобы осознать, что здесь активно действовало изобретение, мы должны мысленно вернуться к тому наивному складу ума, в котором опыт дается непосредственно в терминах ощущений. Самое элементарное рассмотрение того, что означает свет с точки зрения непосредственного опыта, показывает, что мы никогда не испытываем сам свет, но наш опыт имеет дело только с освещенными вещами. Этот фундаментальный факт никогда не изменялся самыми сложными или утонченными физическими экспериментами, которые когда-либо проводились; с точки зрения операций, свет означает не что иное, как *освещенные* предметы. Опыт показывает, что эти освещенные предметы могут находиться друг с другом в различных отношениях; пытаюсь свести эти отношения к порядку и понятности, мы совершаем определенное изобретение. Это обусловлено несколькими кардинальными экспериментальными фактами: во-первых, освещенные предметы имеют простое геометрическое отношение друг к другу, поскольку экраны, размещенные на прямых линиях между освещенными объектами, могут подавлять освещение одного или другого и сами становятся освещенными. Это приводит к концепции прямолинейных лучей света, которая является не более чем описанием геометрического соотношения между освещаемыми объектами. Тогда мы имеем экспериментальный факт асимметричного соотношения освещенных объектов, описанный в терминах источников и поглотителей. Наконец, у нас есть открытие, сделанное на гораздо более поздней стадии и невозможное до тех пор, пока физические измерения не достигли высокой точности, что свет обладает свойствами, аналогичными скорости движения материальных предметов. Впервые это было обнаружено в связи с астрономическими явлениями, такими как сдвиг времени затмения спутников Юпитера и абберация, но позже было обнаружено, что это справедливо и для чисто земных явлений, поскольку луч света, отраженный от удаленного зеркала, возвращается к источнику только по истечении временного интервала, который может быть измерен достаточно совершенными средствами. Это свойство возвращаться по прошествии времени в точности подобно свойству материальных вещей, таких как посыльный, отправленный за ответом, мяч или водяная волна, отскакивающая от стены. Эти различные свойства света совершенно естественно и почти неизбежно приводят к изобретению света как вещи, которая *перемещается*, причем "вещь" не обязательно означает материальную вещь.

Теперь вопрос для нас заключается в том, будем ли мы рассматривать это как простое изобретение, сделанное для удобства мышления, или пойдем дальше и припишем ему физическую реальность, то есть будем ли мы думать о свете как о способном к независимому физическому существованию в пространстве между материей, составляющей источник, и зеркалом? Итак, несмотря на указанное выше сходство, существует по крайней мере одно универсальное и фундаментальное различие между предметом, который перемещается, и светом. У нас есть независимые физические доказательства продолжающегося существования шара, например, во всех промежуточных точках пространства; мы можем видеть его, или слышать, или чувствовать ветер в воздухе, когда он пролетает, или даже прикоснуться к нему. Все эти явления независимы от начальных и конечных явлений, и, следовательно, согласно нашему критерию физической реальности изобретения, мы вправе приписывать физическую реальность пролетающему мячу. Но с лучом света дело обстоит совершенно иначе; единственный способ, с помощью которого мы можем получить физическое доказательство промежуточного существования луча, - это установить своего рода экран, и этот акт уничтожает

как раз ту часть луча, существование которой мы таким образом обнаружили. Не существует физического явления, каким бы ни было то, с помощью которого можно было бы обнаружить свет, кроме явлений источника и поглотителя (понимая, что зеркало включено в идею поглотителя); то есть, не существует явления, независимого от явления, которое привело нас к изобретению путешествующего предмета. Следовательно, с точки зрения операций бессмысленно или тривиально приписывать физическую реальность свету в промежуточном пространстве, и свет как движущуюся вещь следует признать чистым изобретением.

Статус света в точности такой же, как у электрического поля; нет ни малейшего основания приписывать физическую реальность ни тому, ни другому в точках пустого пространства — свет и поле в точке не имеют значения, пока мы не отправимся туда и не проведем эксперименты с какой-нибудь материальной вещью. Конечно, электромагнитная теория света делает это сходство неизбежным при условии, что теория и наши взгляды на природу света и поля верны.

Нельзя отрицать, что существуют некоторые явления, которые при некритическом рассмотрении, по-видимому, оправдывают представление о свете как о предмете, который перемещается; сейчас они будут обсуждены. Вероятно, аргумент, которому обычно приписывается наибольшее значение, основан на явлениях энергии. Прохождение света от источника к стоку сопровождается передачей энергии. Но энергия сохраняется, так что мы должны спросить, где находится энергия в промежутке времени между излучением света источником и его поглощением поглотителем. Ответ очевиден: энергия, конечно, находится в пути, где-то в промежуточном пространстве между источником и стоком. Если мы думаем о свете как о распространяющемся через среду, то среда такова, что в ней может находиться энергия, как в электромагнитной теории света, или, если свет более материален и баллистичен по своему характеру, то то, что перемещается, само обладает энергией. Во-первых, мы замечаем, что принцип сохранения включает в себя концепцию времени, потому что под сохранением мы подразумеваем, что полная энергия Вселенной в фиксированный момент времени постоянна. То есть мы должны интегрировать по всему пространству локальную энергию в определенный момент времени, и это включает в себя распространение концепции времени на все пространство. Далее очевидно, что до тех пор, пока мы не распространим концепцию времени на пространство правильным образом, мы не добьемся сохранения. Доказательство того, что концепцию времени можно распространить на пространство таким образом, чтобы обеспечить сохранение, предполагает знание свойств света. Таким образом, казалось бы, что мы не должны предполагать сохранение при выводе свойств света, когда знание свойств света необходимо для установления сохранения. Однако эти соображения не могут быть приняты как окончательные до тех пор, пока не будет проведен детальный анализ, а это было бы крайне сложно. Но есть более важное соображение, вытекающее из нашей предыдущей критики концепции энергии, а именно, что нет никаких оснований для утверждения, что энергия вообще локализована в пространстве; энергия - это не физическая вещь, а скорее то, что мы бы назвали свойством системы в целом. Если принять такой взгляд на энергию, то весь энергетический аргумент в пользу света как движущегося объекта, а также в пользу существования среды, рушится. Я полагаю, что аналогичные соображения применимы к любым аргументам из теории сохранения импульса.

Возможность обнаружения света в кажущемся пустым пространстве с помощью экрана составляет, пожалуй, самую непосредственную причину для рассмотрения света как движущегося объекта. Я полагаю, что эта точка зрения характерна для всего подхода

Эйнштейна к выводу теорем специальной теории относительности. Световой сигнал Эйнштейна для целей дедукции рассматривается как простая сферическая волна, распространяющаяся от источника и способная наблюдаться по мере ее распространения наблюдателем вне системы, во многом так же, как можно наблюдать волну на воде. Конечно, световой сигнал на самом деле нельзя наблюдать во время прохождения, но мы можем довольно близко приблизиться к этому идеалу, установив экраны в любой точке, где нам заблагорассудится, чтобы волна была видна. Это правда, что простой акт демонстрации существования света уничтожает ту часть луча, существование которой обнаружено, но экрану требуется лишь бесконечно малое количество света, чтобы сделать его видимым, и поэтому с помощью обычного физического аргумента мы можем предположить, что экран обнаружения производит лишь бесконечно малую модификацию всего исходного света.

Наше удовлетворение этой картиной испаряется, если наши нынешние квантовые представления о природе света верны. Мы больше не можем думать о сферическом световом импульсе как о чем-то неприводимо простом, но это чрезвычайно сложная вещь, возможно, более сложная, чем газ, с точки зрения кинетической теории, и она имитирует простоту посредством своего рода усреднения эффектов элементарных квантовых процессов, из которых она состоит. Если мы хотим, чтобы принципы теории относительности продолжали рассматриваться как фундаментальные, или даже если они должны оставаться понятными, мы должны применить наши рассуждения не к сферическим всплескам, а к элементарному процессу, из которого состоят эти всплески. Итак, элементарный квантовый акт, по существу, двойной: существует дискретный акт излучения некоторой дискретной материальной частицы, и этот акт завершается другим дискретным актом (поглощением или рассеянием) на какой-то другой дискретной частице. Мы пока не можем полностью охарактеризовать детали этого двойного процесса, но должны связать место, в котором происходит поглощение, с местом выброса с помощью статистических соображений. Очевидно, однако, что думать об излучении как о начале какого-то процесса, подобного сферической волне, распространяющейся подобно предмету в пространстве, представляет собой совершенно неверный взгляд, потому что в волне нет никакого намека на дискретное место, которое должно ее завершить. Мы можем грубо сказать, что не существует способа, с помощью которого волна может узнать, какой дискретной материальной частицей является для завершения процесса излучения. Возможно, мы можем попытаться спасти ситуацию, вспомнив, что сферическая волна поляризована и поэтому имеет уникальное направление, связанное с ней; но дальнейшее изучение показывает, что это не помогает, потому что уникальное направление - это направление отсутствия потока энергии, и поглощение может происходить в любом направлении, кроме этого. Таким образом, оказывается, что вместо того, чтобы быть подспорьем, точка зрения путешествующей вещи является положительным препятствием, когда мы пытаемся представить с ее помощью по существу двойственную природу элементарного квантового акта.

Еще один правдоподобный аргумент в пользу света как движущегося объекта может быть выведен из нашего принципа связности. Представьте себе затемненный фонарь с заслонкой, которую можно открывать или закрывать так, чтобы испускать кратковременную вспышку света, удаленное зеркало и приемный прибор рядом с источником. Одно из свойств света, которое мы всегда предполагаем, заключается в том, что в источнике не остается постоянных следов акта излучения. Самое тщательное изучение всех деталей фонаря и его окружения через некоторое время после испускания вспышки еще не выявило никаких явлений, которые выдавали бы воспоминание об испускании вспышки, если, возможно, мы не измеряем общую энергию или

импульс и не имеем какого-либо способа узнать, какой была бы энергия или импульс, если бы вспышки не было, и в любом случае мы не можем указать момент в прошлом, когда был испущен сигнал. Точно так же мы не можем сказать, рассматривая зеркало, отражало ли оно когда-либо в прошлом луч света. Рассмотрим теперь две системы, каждая из которых состоит из источника и зеркала, удаленных друг от друга на расстояние 3×10^{10} см., идентичных во всех отношениях, за исключением того, что в одной световой сигнал вспыхнул от источника 1,5 секунды назад, а в другой - всего 0,5 секунды назад. Согласно нашей гипотезе, самый полный анализ источника и зеркала в любой системе не показывает ни малейшей разницы, но, тем не менее, в этих двух системах есть нечто существенно отличающееся, поскольку в одной световой сигнал поступает на экран за 0,5 секунды, а в другой - не раньше, чем за 1,5 секунды. Это нарушает то, что, как мы предположили, можно рассматривать как кардинальный и наиболее общий принцип всей физики, принцип существенной связности, который гласит, что различия между двумя системами должны быть связаны с другими различиями. Наиболее очевидный и простой способ поддержать наш принцип - просто указать на то, что система действительно включала в себя больше, чем мы исследовали: система должным образом состоит из источника, зеркала, экрана и всего промежуточного пространства, так что, если бы мы исследовали промежуточное пространство, мы бы обнаружили там прохождение света в разных положениях в двух системах, что коррелирует с различиями в последующей истории. Этот аргумент кажется мне, пожалуй, самым сильным, который можно выдвинуть в пользу взгляда на свет как на движущуюся вещь. Но он никоим образом не кажется убедительным. В нашем принципе существенной связности концепция времени не упоминается, но мы каким-то образом протащили ее контрабандой при создании вышеупомянутого приложения. Мы стремились дать полное описание нашей системы в определенный момент времени, и это включало распространение концепции времени на пространство. Это само по себе сомнительная операция, и ее можно выполнить разными способами. Но, что более важно, каковы основания для предположения, что систему можно полностью описать, дав полное описание всех ее измеримых частей в какую-то одну эпоху? Мы видели, что в самом общем случае принцип существенной связности должен признавать, что концепция "начального состояния" системы включает в себя всю прошлую историю, и здесь мы, возможно, имеем соответствующий пример. Ответ может быть дан только экспериментальным путем. Имея дело с обычным опытом, когда нам не нужно различать локальное и расширенное время и мы не имеем дела с оптическими явлениями, не может быть никаких сомнений в том, что опыт, по крайней мере, приблизительно, оправдывает ожидание того, что будущее поведение определяется в терминах текущего состояния и что текущее состояние может быть определено в терминах результатов текущих операций, выполняемых в системе. Но прежде чем распространить этот принцип на явления, в которых мы должны различать локальное и протяженное время, мы должны ответить как раз на тот вопрос, который мы сейчас рассматриваем; а именно, происходят ли физические явления в кажущемся пустым пространстве и, следовательно, должно ли пустое пространство быть включено в систему. Мы снова оказываемся в порочном круге. Возможно, опыт покажет, что распространение принципа связности на оптические явления предполагает нечто подобное: а именно, будущее в любой точке материальной системы определяется полным описанием *настоящего* состояния системы в непосредственной близости и *историей* поведения в более удаленных точках, причем эта история простирается на все более длительные интервалы времени по мере удаления точки.

Я полагаю, однако, что эти возможности покажутся не очень удовлетворительными, и что большинство физиков обнаружат в себе очень сильную склонность считать, что будущее определяется в терминах полного описания какой-то мгновенной конфигурации, когда время некоторым подходящим образом растягивается в пространстве. Это инстинктивное требование, чтобы будущее определялось в терминах настоящего, может легко соответствовать оптическим явлениям в наших двух системах, состоящих из источника, зеркала и экрана, без привлечения материального существования света в пустом пространстве, при условии, что наше предположение о том, что излучение света не оставляет после себя постоянной записи в источнике, было неверным. Может случиться так, что детальное изучение источника после выброса выявит постоянные следы, по которым путем экстраполяции можно будет определить момент выброса. Если убежденность в детерминизме будущего сильна, физик вполне может быть вынужден искать здесь новые явления, указывающие на подобную память об излучении.

Давайте теперь посмотрим, как это могло бы повлиять на нашу физическую структуру, если бы мы отказались от отождествления света с движущимся предметом. Одним из следствий является то, что свет больше не нужно рассматривать как обладающий свойством скорости, поскольку скорость, с точки зрения непосредственного опыта, является свойством вещей, перемещающихся с места на место. Отказ от концепции света как движущегося объекта позволил бы нам, таким образом, принять альтернативный метод описания природы с использованием другой концепции скорости; мы видели, что скорость можно определять в терминах операций, отличных от обычных, таким образом, чтобы давать обычные численные результаты при малых скоростях, но другие результаты при высоких скоростях, и, в частности, давать бесконечную скорость для света.^[26]

^[26]Из-за асимметричного характера света не возникает трудностей при присвоении бесконечной скорости свету, потому что те физические операции, с помощью которых мы определяем, кто является источником, а кто поглотителем, полностью отличаются от операций, с помощью которых измеряется скорость; или, другими словами, даже в пределе все еще имеет смысл говорить, что бесконечная скорость имеет направление, связанное с ней.

Теперь нет возражений против бесконечного числа, связанного со светом, если мы больше не думаем о свете как о обладающем физической скоростью. Мы можем, если захотим, продолжать для удобства говорить о скорости света, ясно понимая, что бесконечное значение, которое должно быть приписано этой скорости, соответствует тому факту, что физическое понятие скорости не во всех отношениях применимо к свету. Теперь нам следует пересмотреть наш процесс распространения концепции времени на пространство, потому что раньше это делалось так, чтобы придать свету конечную скорость. Теперь мы должны сделать эту скорость бесконечной, что, очевидно, можно сделать, просто установив удаленные часы на ноль в тот момент, когда они получают световой сигнал, мигающий от наших часов на нуле. Поведение материальных вещей теперь приобретает простой аспект — больше не существует конечного верхнего предела скорости, которую можно придать материальному предмету, и свет больше не обладает парадоксальным свойством иметь одно и то же конечное отношение к каждой из двух материальных систем, которые отличаются друг от друга на конечную величину (то есть первый постулат теории относительности о том, что скорость света равна 3×10^{10} во всех системах отсчета). Вместо этого свет теперь имеет отношение бесконечности к каждой из двух систем, которые отличаются друг от друга лишь на конечную величину, и это естественно с математической точки зрения.

Однако это изменение метода установки часов не все упрощает, но за это приходится платить. Цена такова, что мы должны отказаться от простой связи между скоростью движения вещи и временем ее "ухода и возвращения". Наши изменения не повлияли на местное время; время прохождения света к удаленному зеркалу и возвращения к источнику не изменилось и, следовательно, по-прежнему является конечным, хотя мы описываем скорость света как бесконечную. Итак, исследование сразу показывает, что нет непосредственной связи между понятиями "скорость" и "уходящее и приходящее" время, потому что задействованные операции различны. Измерение линейной скорости в соответствии с нашим определением предполагает использование двух часов в двух разных местах или же часов, движущихся вместе с объектом, в то время как для времени "уйди и приходи" требуются только одни часы в одном месте, а также обязательно изменение направления движения измеряемого объекта. Тогда мы видим, что, согласно определению, принятому для скорости, у нас есть выбор: либо поступить так, как поступил Эйнштейн в ограниченной теории относительности, и сделать так, чтобы время "уходило и возвращалось" было очень просто связано со скоростью; либо мы можем сказать, что уточненные физические измерения показывают, что нечто важное происходит, когда направление движения меняется на противоположное, и что явления не симметричны по отношению к изменению направления. Асимметрию, которая возникает в результате изменения направления движения, мы можем представить себе как своего рода искривление пространства и времени, как небольшой участок дуги окружности, загнутый назад сам на себя, с расходящимися двумя концами. Этот альтернативный способ определения скорости означал бы, что скорость может быть просто измерена только специально расположенным наблюдателем; это не нужно считать помехой, потому что фактически операции были определены только относительно такого наблюдателя.

Какая из этих двух возможных трактовок скорости должна быть принята, в определенной степени зависит от удобства и определяется типом явлений, которые нас больше всего интересуют и которые мы больше всего хотим упростить. Эйнштейна больше всего интересовали оптические явления, так что мотив его выбора очевиден. В этом выборе Эйнштейна не очень очевидно, что желание связать время "уйди и приходи" просто со скоростью сыграло очень заметную роль, но, скорее всего, гораздо большее влияние оказало желание думать о свете как о предмете, движущемся с конечной скоростью. Такой способ представления о свете является фундаментальным для всего подхода к теории ограниченной относительности; без такой картины все математические выводы потеряли бы свою простоту и убедительность, поскольку во всех выводах мы неизбежно думаем о себе как о наблюдателе извне, наблюдающем за вещью, которую мы называем светом, перемещающимся взад и вперед, как любая физическая вещь.

Теперь не может быть никаких сомнений в том, что, когда возможен выбор, удобство и простота являются важными соображениями; но я полагаю, что есть еще одно, гораздо более важное соображение, а именно, наиболее совершенное возможное воспроизведение физической ситуации. Мне кажется, что очень сомнительно, что Эйнштейн и вся остальная современная физика, если уж на то пошло, не заплатили слишком высокую цену за простоту и математическую податливость, решив рассматривать свет как движущийся объект. Физически суть света в том, что он не является вещью, которая перемещается, и, решив относиться к нему как к вещи, которая перемещается, я не вижу, как мы можем ожидать избежать самых серьезных трудностей. Конечно, вся проблема природы света в настоящее время представляет наиболее острую трудность. Точка зрения на перемещение вещей, даже в том виде, в каком ее

рассматривал Эйнштейн, не приводит нас к ситуации, которая хоть сколько-нибудь удовлетворяет логике. Мы знакомы только с двумя видами перемещающихся объектов: возмущением в среде и баллистическими объектами, такими как снаряд. Но свет не похож на возмущение в среде, поскольку в противном случае мы обнаружили бы другую скорость при движении относительно среды, а такого явления не существует; свет также не похож на снаряд, потому что скорость света относительно наблюдателя не зависит от скорости источника. С другой стороны, при абберации мы имеем явление, подобное тому, которое демонстрируют снаряды. Свойства света больше похожи на свойства снаряда, чем, возможно, принято считать, как показано в статьях Ла Розы[27] по баллистической теории света. Свойства света остаются неуместными и непоследовательными, когда мы пытаемся думать о них в терминах материальных вещей.

[27]М. Ла Роза, Наука, июль-август 1924 года.

Ограниченная теория относительности Эйнштейна внесла большой вклад в такую группировку и координацию явлений, что все они могут быть охвачены простой математической формулой, но он, похоже, не представил их в таком свете, чтобы они были простыми или легкодоступными для физического восприятия. Объяснительный аспект полностью отсутствует в работе Эйнштейна.

Ввиду всех наших нынешних трудностей, казалось бы, мы должны, по крайней мере, попытаться начать все сначала и разработать концепции для лечения всех оптических явлений, которые приближаются к физической реальности. Никто так отчетливо, как я, не осознает, что это самое трудное, что можно сделать. Если нам когда-либо удастся провести такую модифицированную трактовку, очевидно, что изменится не только структура большей части нашей физики, но, в частности, должен быть изменен формальный подход к тем явлениям, которые сейчас рассматриваются теорией относительности, и, следовательно, изменится внешний вид всей теории. Я полагаю, что это очень серьезный вопрос, не увидим ли мы в конечном итоге такого изменения и не является ли вся формальная структура Эйнштейна более или менее временным явлением.

Хотя чрезвычайно трудно предвидеть, каким будет лечение в будущем, легко предположить некоторые его особенности. По сути, элементарный процесс любого излучения, воспринимаемого как радиация, двоякий. Существует некоторый процесс в источнике и некоторый сопутствующий процесс в стоке, и ничего больше, насколько у нас есть какие-либо физические доказательства; более того, элементарный акт несимметричен в том смысле, что источник и сток физически отделены друг от друга. Это наиболее полное выражение физических фактов; нигде нет никаких физических доказательств включения третьего элемента (эфира). Следовательно, все явления, воспринимаемые наблюдателем (и это охватывает все физические явления), могут быть определены только источником и поглотителем и отношением источника и поглотителя друг к другу, поскольку нет ничего другого, что имело бы физический смысл с точки зрения операций. Эта формула охватывает не только возможность таких явлений первого порядка, как абберация и эффект Доплера, но также показывает, что таких эффектов второго порядка, которые искали Майкельсон и Морли, должно быть, не существует. Таким образом, будет видно, что некоторые следствия теории относительности неявно содержатся в определенных очень широких точках зрения. Один интересный вопрос, на который необходимо

ответить, прежде чем мы сможем продвинуться очень далеко с помощью нового подхода, заключается в том, является ли элементарный оптический процесс *необходимым* двояким, или мы можем иметь излучение без поглощения, то есть излучение в пустое пространство. Льюис, по-видимому, подразумевает в недавних статьях, что это невозможно.^[28] Астрономы уже указывали на трудности в объяснении таких явлений, как температурное равновесие планет, если мы предполагаем, что это так.

^[28] Например, в книге: Г. Н. Льюис, *Анатомия науки*, издательство Йельского университета, 1926, стр. 129.

ДРУГИЕ КОНЦЕПЦИИ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Теперь мы обратимся к некоторым другим концепциям теории относительности. Одним из наиболее важных из них является "событие"; фактически Уайтхед сделал это понятие фундаментальным.^[29] Мы уже обсуждали концепцию "события" в рамках концепции "идентичности", с которой оно тесно связано. Эйнштейн обычно рассматривает это событие просто как совокупность четырех координат: трех пространственных и одной временной. Принцип общей теории относительности, а именно, что законы природы должны иметь инвариантную форму, когда они сформулированы математически, предполагает предположение, что природу можно разложить на события, и выражается требованием, чтобы математические соотношения между координатами цепочки событий были инвариантными. Та же идея выражена Эйнштейном и в другой форме, а именно, что природа может быть полностью охарактеризована в терминах пространственно-временных совпадений. Развивая эту идею, Эйнштейн предполагает, что результаты всех измерений могут быть представлены в терминах таких совпадений.

Теперь мне кажется весьма сомнительным, возможен ли или достаточен анализ природы на события. Что касается точки зрения совпадения, кажется совершенно очевидным, что мир наших непосредственных *ощущений* не может быть описан в терминах совпадений; как, например, мы должны описать в терминах пространственно-временного совпадения фотометрическое сравнение интенсивности двух источников освещения, или сравнение высоты двух звуков, или местоположение звука с помощью бинаурального эффекта?

^[29] А. Н. Уайтхед, *Исследование принципов естественного познания*, издательство Кембриджского университета, 1919, глава V.

Чтобы обосновать точку зрения о совпадении, мы, очевидно, должны проанализировать вплоть до бесцветных элементов, находящихся за пределами нашего чувственного восприятия. Возможно, не кажется необоснованным ожидать, что вселенная полностью детерминирована с точки зрения положений как функции времени всех положительных и отрицательных электронов; но введение такого тезиса сейчас, безусловно, выходит за рамки существующего экспериментального обоснования и противоречит общему духу теории относительности,

которая нигде больше не предполагает каких-либо ссылок на мелкомасштабную структуру вещей. Даже если бы мы были готовы игнорировать все эти возражения, мы все равно имели бы тот факт, что разница между положительным и отрицательным электроном не содержится ни в каком описании простых координат.

Еще одно очень важное принципиальное сомнение относительно возможности анализа природы на основе событий возникает из-за характера самого понятия события. Мы видели, что идея события предполагает существование разрывов, и что это может лишь приблизительно соответствовать физическому факту, потому что разрывы, по-видимому, теряют свою резкость по мере того, как мы делаем наши измерения более точными. Тезис о том, что природа может быть описана в терминах разрывов очень малого масштаба, кажется слишком особенным, чтобы его можно было сделать фундаментальной частью теории с общими претензиями на теорию относительности. Фактически, это, а также соображение, которое будет упомянуто позже, наводит на мысль, что аргументы и результаты общей теории относительности могут быть по сути ограничены крупномасштабными явлениями.

Теперь мы переходим от этих несколько специальных вопросов к вопросу о том, почему именно Эйнштейну удалось в общей теории относительности получить новые и физически корректные результаты из общих рассуждений, по-видимому, чисто математического характера. Мы убеждены, что чисто математические рассуждения никогда не могут привести к физическим результатам — что если что-то физическое выходит из математики, то оно должно быть облечено в другую форму. Наша задача состоит в том, чтобы найти, где физика вошла в общую теорию.

Здесь необходимо разрешить два вопроса: во-первых, мы должны рассмотреть значение того факта, что Эйнштейн смог описать отношения в природе в математической форме, и, во-вторых, того факта, что он смог прийти к математической формулировке этих физических отношений путем рассуждений, по-видимому, чисто математического характера, исходя из постулатов чисто формального математического содержания (неизменность законов природы в обобщенных координатах). Итак, теория относительности, по-видимому, в первом отношении не отличается от любой другой области математической физики, такой как, например, классическая математическая теория электричества и магнетизма, и этот вопрос уже затрагивался в предыдущей главе. Это факт, что поведение природы во многих случаях может быть выражено с высокой степенью точности на математическом языке, и теория относительности не уникальна в этом отношении. В любом случае, мы не должны допускать, чтобы эта возможность математической формулировки затушевывала существенный факт, что все физические знания по своей природе являются лишь приблизительными, так что мы можем ожидать, что в любой момент, когда мы доведем наши измерения до более высокой степени точности, обнаружится, что наше математическое выражение законов было не совсем точным, как, например, в случае с законом всемирного тяготения Ньютона. Я не думаю, что Эйнштейн стал бы утверждать, что утверждения теории относительности отличаются в этом отношении от любых других наших утверждений о природе, хотя, очевидно, некоторые из его последователей видят здесь нечто большее. (С оперативной точки зрения значение, которое следует придавать "чему-то большему", несколько неясно.)

Что касается второго вопроса, мы можем остановиться и заметить, что специальная теория находится в совершенно ином положении, чем общая теория. Специальная теория во всем

гораздо более физична; ее постулаты носят физический характер, и очевидно, что физика проникла в результаты через эти постулаты. Мне, без сомнения, кажется, что Эйнштейн проявил интуитивную проницательность великого гения, осознав, что существуют взаимные связи между физическими явлениями, которые могут быть описаны очень упрощенным языком в терминах концепций, слегка измененных по сравнению с теми, которые уже широко используются. Однако, принимая во внимание замечания, сделанные о природе света, правомерно задаться вопросом, всегда ли будут актуальны формулировки даже специальной теории. По-видимому, верно, что все факты природы, даже в отсутствие гравитационного поля, не могут быть связаны простыми формулировками специальной теории; что физические соотношения просты только в подгруппе; и что, если мы хотим иметь дело с *всеми* оптическими явлениями, мы зашли в своих упрощениях слишком далеко, поскольку излучение светового сигнала - это не простое событие, и свет по своей природе не похож на движущийся объект. Именно те физические явления, которые игнорируются при трактовке света так, как это делает специальная теория, приобретают все большее значение в умах физиков, и это повод задуматься, не следует ли в конечном счете рассматривать специальную теорию Эйнштейна просто как очень удобный способ связать воедино большую группу важных физических явлений, но ни в коем случае не как полное изложение естественных отношений.

Однако что касается общей теории, я считаю, что ситуация совершенно иная. Фундаментальный постулат о том, что законы природы имеют инвариантную форму во всех координатных системах, в высшей степени математичен и носит полностью рукотворный характер. Какое дело природе до того, как человек может выбрать способ описания ее явлений, и как мы можем ожидать, что ограничения нашего процесса описания ограничат описываемую вещь? Более того, метод Эйнштейна, связывающий его математическую формулировку и природу посредством совпадений 4-х событий (три пространственных, одна временная координаты), кажется, очень далек от реальности, поскольку он полностью исключает описательный фон, только в терминах которого 4-х событие приобретает физическое значение. Тем не менее, фокусник Эйнштейн извлек из шляпы три определенных вывода о физической вселенной (сдвиг перигелия Меркурия, смещение видимого положения звезд на краю диска Солнца и сдвиг в инфракрасную сторону линий спектра от источника в гравитационном поле), и проблема для нас, физиков, состоит в том, чтобы выяснить, каким способом были получены эти результаты.

Я полагаю, что изучение того, что на самом деле сделал Эйнштейн при получении своих результатов, покажет, что ситуация действительно отличается от предложенной выше. Во-первых, требование о том, чтобы законы природы имели инвариантную форму, на самом деле не накладывает никаких ограничений, в чем любой может убедиться, поставив перед собой задачу выразить, например, обратный кубический закон тяготения в терминах обобщенных координат. Работа по выражению такого закона может быть атакована совершенно обычным способом. (Следует отметить существенное различие между требованиями неизменности специальной и общей теорий; специальная теория требует, чтобы скорость света, например, имела одинаковое *числовое* значение во всех допустимых системах; общая теория просто утверждает, что все законы имеют одинаковую *буквальную* форму, но с переменными числовыми коэффициентами.) Но, как говорит Эйнштейн, если кто-нибудь действительно попытается выполнить работу по выражению закона обратного куба в обобщенных координатах, он сочтет задачу непомерно сложной и будет искать какую-нибудь более простую формулировку. Следовательно, что Эйнштейн на самом деле сделал, так это потребовал, чтобы

законы природы были *простыми* в обобщенной форме. Теперь мы знаем, что закон всемирного тяготения, ранее выраженный в обычных координатах как закон обратных квадратов, был приблизительно точным и к тому же простым. Любые отклонения от этого закона невелики, и весь опыт заставляет нас ожидать, что до первого порядка малых величин отклонения можно учесть математически в виде небольших поправочных членов к этому закону. Однако само по себе это ничего не дает, потому что небольшой поправочный член может быть добавлен к нашим уравнениям бесконечным числом способов. Если, однако, мы знаем, что уравнение должно быть определенного типа после добавления корректирующих членов, возможности настолько ограничены, что может быть определена форма корректирующего члена. Рассуждая о вероятном типе уравнения, Эйнштейн выдвинул соображения, с помощью которых физика проникает в ситуацию.

Во-первых, специальная теория подготовила нас к возможности обнаружения того, что наши измерительные приборы могут изменяться в гравитационном поле аналогично укорочению измерительной палочки при приведении ее в движение. Фактически, специальная теория указала, что в ускоренной системе модификации могут быть слишком сложными, чтобы их можно было рассматривать с помощью этой теории. Таким образом, в отсутствие конкретной информации мы должны быть готовы к самому общему возможному изменению пространства-времени в гравитационном поле. Поэтому при описании пространства-времени мы должны использовать координаты, адаптированные для обработки наиболее общих возможных соотношений, и это обобщенные координаты Римана, которые уже обсуждались математиками. Возвращаясь теперь к критерию Эйнштейна, согласно которому уравнения должны быть простыми, у нас есть требование, чтобы уравнения были простыми в обобщенных координатах, и, конечно, они также должны сводиться к обычным уравнениям (то есть уравнениям специальной теории относительности) в пространстве, где нет гравитационного поля. При решении дальнейшего вопроса о том, к какому типу, вероятно, относится уравнение, на нас влияют соображения удобства, а также физические соображения. Практически единственный тип уравнений, который может быть обработан математически, - линейный, так что мы, конечно, сначала попробуем, не может ли этот тип уравнений продолжать действовать. Теперь ньютоновский закон обратного квадрата может быть выражен в терминах линейного дифференциального уравнения второго порядка в старых декартовых координатах (уравнение Пуассона), так что наше самое непосредственное предположение состоит в том, что уравнения остаются линейными и второго порядка в обобщенных координатах. Фактически, этого требования оказывается достаточно для определения малого поправочного члена, на который можно обобщить обычные уравнения; необходимо изучить статьи Эйнштейна, чтобы увидеть, как это работает в деталях.

Все это выглядит довольно математично, но на самом деле в нем много физического содержания, потому что системы, которые могут быть описаны линейными уравнениями второго порядка, обладают определенными физическими свойствами. Требование, чтобы уравнения были линейными, соответствует одному из наиболее фундаментальных свойств нашей вселенной — концепция причинности была бы невозможна или была бы сильно изменена во вселенной, управляемой нелинейными уравнениями, поскольку совместное действие двух причин, действующих вместе, не было бы суммой их эффектов, действующих по отдельности, так что анализ ситуации на простые элементы был бы невозможен и концепция причинности, вероятно, не возникла бы. Кроме того, уравнение типа Пуассона второго порядка означает, что существуют явления распространения, а уравнения механики второго порядка предполагают

существование скалярной энергетической функции. Таким образом, если поведение вселенной вообще можно описать дифференциальными уравнениями, то эти уравнения должны быть линейными второго порядка, если мы хотим, чтобы вселенная обладала самыми широкими физическими характеристиками нашей собственной вселенной. Следовательно, что Эйнштейн действительно сделал, так это потребовал, чтобы даже когда пространство-время искривляется присутствием гравитационного поля, те физические явления, которые могут быть описаны в терминах дифференциальных уравнений, продолжали описываться линейными дифференциальными уравнениями второго порядка; то есть чтобы природа продолжала описываться в терминах концепции причинности, с явлениями распространения и простой энергетической функцией. Следствия подобного предположения о свойствах природы апеллируют к нашей физической интуиции как заслуживающие внимания, и, конечно, мы знаем экспериментальное обоснование.

Теперь можно высказать несколько общих замечаний по достигнутой таким образом структуре. Во-первых, вся структура носит исключительно описательный характер; мы находим определенные корреляции в природе, которые мы описываем со значительной полнотой в математических уравнениях, не вводя никакого нового элемента объяснения или механизма. Мы видели, что по мере того, как мы расширяем наш диапазон от области обычных явлений до явлений иного характера, мы достигаем стадии, когда на какое-то время процесс объяснения, по-видимому, останавливается, и нам приходится довольствоваться констатацией простой корреляции между элементами; однако позже эти элементы могут быть приняты как конечные в расширенной схеме объяснения, и процесс объяснения возобновляется. Находимся ли мы сейчас на таком этапе развития общей теории относительности, и может ли позже быть создана новая схема объяснения, основанная на корреляциях Эйнштейна? Это, конечно, вопрос индивидуального суждения; лично я сомневаюсь в том, что элементы формулировки Эйнштейна, такие как искривление пространства-времени, достаточно тесно связаны с непосредственным физическим опытом, чтобы когда-либо быть принятыми в качестве конечной точки в схеме объяснения, и я очень сильно ощущаю потребность в формулировке в более интимных физических терминах.

Во-вторых, мы должны повторить замечание, уже сделанное при обсуждении времени, а именно, что все еще существует очень большой разрыв между теорией и ее физическим применением, поскольку у нас нет способа отождествить наши физические часы и наши физические меры времени с тем, что называется временем в формулах. Этот пробел должен быть заполнен спецификацией физической структуры часов.

Всегда было очень непонятно, почему Эйнштейн так настойчиво настаивал на том, что сдвиг в сторону инфракрасного излучения является неотъемлемой частью общей теории, и что если сдвиг не будет найден, теория должна рухнуть. Другими словами, Эйнштейн настаивает на том, что предположение о том, что атом - это часы, является неотъемлемой частью его теории. Я полагаю, что такое отношение может быть вызвано осознанием Эйнштейном того самого недостатка в логической структуре, который мы сейчас подчеркиваем. В отсутствие какого-либо метода уточнения деталей конструкции хотя бы одних часов теория относительности становится чисто академическим делом, если только в природе не существуют конкретные предметы, которые могли бы служить часами. Эйнштейн *должен* либо уметь рассказать, как сконструировать часы, либо указать на конкретный пример часов. Он выбрал атом как конкретную вещь. Несомненно, причиной была очевидная простота механизма колебаний

атома, о чем свидетельствует точное равенство частот, излучаемых всеми атомами одного и того же элемента. Если атом - это не часы, то где в природе их можно найти? Но за последние несколько лет мы пришли к пониманию чрезвычайно сложной квантовой структуры атома, и тезис Эйнштейна во многом утратил свою инстинктивную привлекательность.

Поскольку Эйнштейн создал теорию относительности, возможно, было бы нелюбезно подвергать сомнению его право утверждать, что предположение о том, что атом является часами, является неотъемлемой частью теории. Это, однако, сводится к простому вопросу языка и не затрагивает произвольного характера процедуры. Это не мешает нам иметь вторую разновидность теории относительности, теорию X вместо теории Эйнштейна, точно такую же, как у Эйнштейна, за исключением того, что, возможно, теперь "часы" построены в терминах периода жизни радиоактивно распадающегося элемента. Единственный способ устранить произвол, по-видимому, состоит в том, чтобы постулировать, что все естественные процессы, которые протекают естественно сами по себе, независимо от того, что мы можем делать, могут с равным успехом служить часами и давать одинаковые результаты. Но, отвечая на вопрос об оперативном значении выражения "независимо от того, что мы можем делать", нам фактически придется ответить на вопрос о том, что такое часы. Однако эта точка зрения, возможно, немного приблизит нас к нашей цели - найти способ определить структуру часов.

Наконец, общая теория не является полностью общей, а применима только к определенному кругу явлений, точно так же, как мы видели, что специальная теория охватывает не все оптические явления. Общая теория применима только к тем явлениям, которые могут быть описаны в терминах дифференциальных уравнений, то есть, по преимуществу, к явлениям крупного масштаба. Если квантовые явления нельзя описать дифференциальными уравнениями,^[30] поскольку, очевидно, сейчас они не могут этого сделать, общая теория относительности по самой своей природе не может быть применима. Общая теория относительности не дает нам всеобъемлющей формулировки поведения всей природы, и, насколько мы можем видеть, мы все еще как никогда далеки от такой общей формулировки.

^[30] Это утверждение теперь приобретает очень сомнительный аспект в свете новой квантовой волновой механики (март 1927 г.).

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Физически существует большая разница между поведением систем при равномерном относительном прямолинейном движении и систем при равномерном относительном вращении. Специальная теория относительности утверждает, что существует вдвое бесконечное число систем со всеми возможными равномерными прямолинейными скоростями относительно друг друга, во всех из которых физические явления имеют точно такие же взаимоотношения, то есть законы природы одинаковы. Теперь простая формулировка принципа наводит на мысль о смысле, в котором здесь используется слово "система". Очевидно, что "система" относится только к части вселенной; мы не делаем безнадежно

академического заявления о том, что произошло бы, если бы у нас было бесконечное количество вселенных для экспериментов, но говорим об операциях, которые могут быть приблизительно реализованы в нашей собственной вселенной. "Систему" рецептуры мы можем представить себе как полностью оборудованную лабораторию, расположенную в пустом космосе, так далеко от небесных тел, что они не могут оказать никакого эффекта. Различные системы рецептуры - это разные лаборатории, построенные по совершенно одинаковым архитектурным чертежам. Явления, к которым применимы постулаты теории относительности, - это явления, которые полностью относятся только к той или иной из этих лабораторий. Значение этого ограничения не является полностью определенным и в любом частном случае должно частично определяться контекстом. Очевидно, что наблюдение из окна лаборатории за другой лабораторией, проезжающей с определенной скоростью, не может считаться одним из разрешенных явлений. Еще менее допустимым является наблюдение того, что центр тяжести всей звездной вселенной имеет определенную скорость перемещения относительно лаборатории. Следовательно, специальный принцип относительности косвенно содержит утверждение о том, что определенные очень большие и важные классы физических явлений могут быть изолированы и рассматриваться как происходящие без влияния остальной вселенной. Учитывая теперь возможность изоляции, у нас есть второе утверждение, которое обычно трактуется так, как если бы оно было полным утверждением ограниченного принципа, а именно, что существует второе бесконечное множество систем, в которых эти явления протекают одинаково, независимо от относительного движения систем друг относительно друга. Как только значение наблюдения становится понятным, что абсолютное движение не имеет смысла с точки зрения операций, мы видим, что это последнее утверждение сразу приобретает наиболее простой и удовлетворяющий аспект, фактически, настолько простой и неизбежный, что мы склонны видеть в этом полную суть ситуации и рассматривать бессмысленность абсолютного движения как дающее неопровержимое доказательство ограниченного принципа.

С таким уклоном мы теперь переходим к изучению фактов вращательного движения и приходим в замешательство, обнаруживая, что они совершенно разные. Абсолютному вращательному движению с точки зрения измерительных операций может быть придано не большее значение, чем абсолютному перемещению, но, тем не менее, явления, очевидно, совершенно различны в разных системах при относительном вращательном движении (явления разрыва, например), так что, по-видимому, существуют физические явления, с помощью которых понятию абсолютного вращательного движения может быть придано определенное физическое значение. Учитывая, что в пустом пространстве находятся два мира, подобных нашему, но окруженных непроницаемыми облаками, и каждый снабжен маятником Фуко, тогда мы полагаем, что физически возможно, что мы можем обнаружить, что в одном из этих миров плоскость вращения маятника постепенно меняет направление, в то время как в другом он остается неподвижным. Это различие мы считаем возможным без учета других сопутствующих физических явлений, которые причинно связаны с вращением маятника (конечно, мы должны сделать два мира из бесконечно жесткого материала и исключить другие явления, которые мы рассматриваем как чисто случайные), так что мы, очевидно, имеем здесь противоречие нашему кардинальному физическому принципу существенной связности. Мы, конечно, не склонны отказываться от нашего принципа и считаем, что как физический факт, если бы облака можно было испарить, наблюдатель в одном мире обнаружил бы, что он вращается относительно системы неподвижных звезд, тогда как соответствующий наблюдатель в другом мире обнаружил бы, что он неподвижен. Таким образом, наш принцип существенной связности

сохраняется в том смысле, что вращение плоскости маятника связано с вращением относительно остальной вселенной, всего мира, в котором установлен маятник. Насколько мне известно, никакого другого способа сохранить наш принцип никогда не предлагалось. Но это требует, чтобы мы отказались от нашей физической гипотезы о возможности изоляции системы. Здесь нет вопроса об ограничении поведения; мы считаем, что независимо от того, насколько далеко наш вращающийся мир находится от остальной вселенной, маятник Фуко всегда будет вести себя одинаково; система никогда не может быть изолирована, но такие локальные явления, как неизменность плоскости маятника, всегда по существу определяются остальной вселенной.

Если теперь наша система не может быть изолирована, мы должны вернуться к явлениям поступательного движения. В принципе, акт изоляции не может быть выполнен, остальной вселенной нельзя пренебрегать, и мы должны ожидать, что различные состояния поступательного движения, а также различные состояния вращательного движения по отношению к остальной вселенной будут оказывать влияние на явления. Мы поставили перед собой задачу понять это очевидное огромное различие между явлениями перевода и ротации. Мы отмечаем, что то, что, по-видимому, является принципиальным различием, может, в силу приблизительного характера всех измерений, быть лишь разницей в величине, и что трансляционные эффекты могут существовать слишком малыми, чтобы их можно было обнаружить. Физическую основу такого различия можно найти в достижимых на практике чрезвычайно различных числовых значениях поступательных скоростей и скоростей вращения по отношению к остальной части Вселенной. Описывая явления космического масштаба, мы можем правдоподобно измерять явления в единицах, соизмеримых с масштабом самих явлений. Таким образом, при измерении линейных расстояний мы, возможно, можем выбрать в качестве единицы длины диаметр звездной вселенной, а при измерении вращения - полное изменение направления относительно всей вселенной. Последнее означает изменение угловой ориентации на 2π , первое означает длину порядка 10^6 световых лет. Измеренные в таких космических единицах, практически достижимые угловые скорости несравнимо больше линейных. Теперь мы видим, что возможно, что реальное положение дел таково: а именно, на явления в любой системе влияет движение по отношению ко всей вселенной, независимо от того, является ли это движение поступательным или вращательным, и величина эффекта связана со скоростью движения коэффициентом общего порядка единицы, когда скорость измеряется в космических единицах. Это последнее является всего лишь применением аргумента, столь часто приводимого в физике относительно порядка величины неизвестных числовых факторов, и будет найдено развернутым на странице 88 моей книги по *размерному анализу*. Линейные скорости, достижимые на практике, в настоящее время настолько низки, что их влияние еще не было обнаружено экспериментально, но угловые скорости высоки, и этот эффект легко продемонстрировать. В этом свете специальный принцип относительности по своему характеру ничем не отличается от любого другого физического закона; он является лишь приблизительным, и когда-нибудь наши измерения могут стать достаточно точными, чтобы обнаружить его ограничения.

Здесь мы выдвинули гипотезу, которую можно назвать гипотезой имманентности всей вселенной, а именно, что изоляция невозможна или что остальная часть вселенной, какой бы удаленной она ни была, всегда оказывает локальное влияние по крайней мере на некоторые явления. По сути, это гипотеза Маха,[\[31\]](#) и приводит к ситуации, которую, я думаю, можно

рассматривать с логической невозмутимостью, хотя многим физикам она всегда казалась в высшей степени антифизической по своему характеру.

[31]Е. Мах, Наука механики, переведено Маккормаком, Издательство Open Court Publishing Co., Чикаго, 1893. Особенно см. стр. 235.

Безусловно, следует признать, что большая часть физического опыта оправдывает нашу мысль о том, что последствия могут быть настолько незначительными, насколько нам заблагорассудится, если мы отойдем достаточно далеко от причины эффекта. Но если мы примем соображения, изложенные на предыдущих страницах, мы должны быть готовы признать, что по мере расширения диапазона явлений их характер может меняться и что в этих новых сферах мы должны, по крайней мере на первых порах, довольствоваться простым утверждением о корреляциях. Конечно, у нас есть очень веские физические доказательства формальной корреляции между маятником Фуко и остальной вселенной. Но корреляция такого рода может не иметь значения из-за ее широты; мы никогда не сможем доказать значимость корреляции, проведя эксперимент в отсутствие остальной вселенной. Действительно ли мы сделали что-то большее, чем просто привели вещи в такую формальную ситуацию, что на них нельзя нападать, возможность, которую, как уже предполагалось, простые законы нашего мышления, кажется, всегда оставляют открытой, или же в том, что мы сделали, есть какое-то физическое содержание? Мы видели, что если наша корреляция также подтверждается другими явлениями, то мы можем принять ее как имеющую физическое содержание. Теперь есть лишь слабый проблеск предположения, что наша гипотеза об имманентности вселенной может быть необходима другими способами. Гравитационная постоянная и скорость света всегда рассматриваются как произвольные величины, воздействующие на вселенную извне, без связи с другими явлениями. Тем не менее, я полагаю, что никто не считает эту ситуацию в конечном счете удовлетворительной и не тешит себя надеждой, что когда-нибудь мы сможем дать какой-то отчет о числовой величине этих констант. До сих пор нам не удалось найти какой-либо связи между этими константами и мелкомасштабными явлениями, такими как заряд электрона, его масса и т.д., Так что есть некоторая вероятность ожидать, что когда-нибудь может быть обнаружена связь с космическими явлениями; действительно, общая теория относительности уже готовит нас именно к такой возможности. Теперь скорость света и гравитационная постоянная контролируют маломасштабные эксперименты, поскольку, конечно, эти две константы могут быть измерены локальными экспериментами, так что, если космическая связь будет найдена, мы должны будем контролировать локальное поведение с помощью космических вещей, и, следовательно, это еще один пример имманентности всей вселенной. Мне нет необходимости тратить время на извинения за в высшей степени спекулятивный характер всего этого. Однако стоит подчеркнуть, что наши общие соображения о значении термина "объяснение" подготовили нас к признанию разумным именно такого рода объяснения, содержащегося в гипотезе об имманентности вселенной, и, следовательно, к тому, чтобы зарезервировать место в нашем физическом мышлении для возможностей такого рода, несмотря на тот факт, что такие соображения обычно не принимаются во внимание и могут показаться многим противоречащими духу физики.

КВАНТОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ[32]

История квантовой теории вплоть до настоящего времени во многих отношениях повторяет историю ранних теорий электричества, поскольку все наше мышление было в механических терминах. Насколько нам теперь известно, квантовые явления всегда связаны с атомами. Мы создаем для атома мысленную модель со всеми свойствами механизмов обычной шкалы величин и с несколькими впечатленными свойствами в дополнение, которые представляют новые квантовые соотношения. Как мы теперь понимаем, атом имеет массивное ядро, вокруг которого электроны вращаются по закону обратных квадратов, а связь между массой электрона, его ускорением и действующей на него силой является обычной в ньютоновской механике.

[32]Этот раздел был написан в начале 1926 года без доступа к новейшей литературе. С тех пор "новая" квантовая механика настолько изменила наше отношение к квантовым явлениям, что ряд следующих утверждений заменен изложением нынешнего мнения. Однако, мне показалось, что стоит оставить раздел в том виде, в каком он был написан, потому что многие из разработок, фактически использованных в "Новой механике", следуют тем направлениям, которые, как здесь утверждается, они должны были следовать, и пока представляют собой интересное подтверждение точки зрения этого эссе.

Пространство, в котором циркулирует электрон, считается евклидовым, а движение описывается во времени, которое можно измерить с помощью часов обычным способом. Общие уравнения электродинамики неприменимы; внутри атома нет эффектов распространения, движение электронов не создает магнитного поля, и нет излучения, когда электрон находится в одном из своих возможных стабильных состояний, несмотря на ускорение. Мы можем, если пожелаем, при определении характера движения полностью пренебречь электрическим происхождением закона обратных квадратов и рассматривать его просто как действующую силу без дальнейших последствий. На обычные пространственные, временные и механические характеристики модели накладываются дополнительные квантовые свойства, одно из которых определяет конкретную орбиту, по которой движется электрон [$\oint \mathbf{p} d\mathbf{q} = nh$], а другое определяет частоту излучения, испускаемого при переходе электрона с одной разрешенной орбиты на другую. Не предлагается никакого механизма для объяснения этих квантовых условий, хотя условия сформулированы в механических терминах.

Теперь мы должны спросить, каково значение с точки зрения операций наших обычных концепций пространства-времени и механики применительно к явлениям такого порядка. Конечно, очевидно, как уже подчеркивалось, что концепции полностью изменились по характеру, потому что мы не измеряем орбиту электрона, например, отступая от диаметра метровыми палочками или измеряя время, необходимое свету для прохождения по диаметру. Особой чертой, представляющей непосредственный интерес в этой изменившейся ситуации, является изменение количества наших концепций на атомарном уровне. Я не буду пытаться путем точного анализа определить количество независимых концепций на этом уровне; вероятно, такой анализ невозможен. Мы можем, однако, сделать приблизительное предположение. По-видимому, наиболее важное понятие при описании отношений внутри квантовой системы соответствует понятию энергии в обычном масштабе. Изменения энергии

определяют частоту испускаемого излучения, а также соотношения при столкновениях атомов и электронов; эти соотношения при столкновениях имеют прямую связь с экспериментом через напряжения, приложенные к электронам в экспериментах по столкновению. Аналог концепции импульса также, по-видимому, имеет независимое значение, как показано эффектом Комптона. Частота испускаемого излучения также имеет независимое экспериментальное значение. Я полагаю, что эти три вещи - это все, что имеет прямое значение для квантовых экспериментов, проводимых до настоящего времени. В любом случае, совершенно очевидно, что на квантовом уровне концепций, которые в настоящее время имеют практическое значение, значительно меньше, чем на уровне обычного опыта.

Помимо вопроса удобства, может быть оправдано продолжение использования наших старых механических форм мышления, если при этом будут предложены новые экспериментальные соотношения. То, что очень большое количество таких, пока еще не открытых отношений может быть предложено каким-то подобным образом, сразу очевидно. Таким образом, в настоящее время у нас нет знаний о каком-либо явлении, связанном с тем, что делает электрон при переходе с одного энергетического уровня на другой. Сколько времени требуется для прохождения? Каков его путь во время прохождения? Подчиняется ли он обычным законам электродинамики во время прохождения? Когда и где испускается излучение, соответствующее прохождению? Когда электрон покидает одну стабильную орбиту, уже определена ли орбита, на которую он в конечном итоге приземлится? Имеет ли последовательность излучения, испускаемая при переходе с одного энергетического уровня на другой, определенную длину в пространстве, или она может иметь переменную длину и, соответственно, нечто, соответствующее переменной амплитуде? Что происходит с излучением, когда нарушается прохождение электронов до завершения излучения кванта? Каков механизм, с помощью которого накладываются квантовые условия? Разве не возможно, что часть ключа к разгадке способа перехода от чисто квантового поведения к поведению классической механики может быть найдена в поведении электрона при переходе с одного энергетического уровня на другой? Конечно, у нас есть тенденция к классическому поведению в таких условиях, например, при высокой температуре или в сильно конденсированных системах, в которых можно ожидать, что время, затраченное на переход, станет более важной частью общего времени.

В соответствии с этими вопросами должно существовать множество еще не открытых явлений, и поэтому механическая точка зрения имеет свою ценность при предложении экспериментов по обнаружению таких эффектов. Конечно, еще слишком рано говорить о том, каким будет конечный результат здесь; мы не можем сказать, будет ли в конечном итоге найдено достаточно новых экспериментальных видов поведения, чтобы восстановить количество независимых концепций до уровня обычного опыта, или действительно окажется, что требуется большее количество концепций. Ожидать большего числа противоречит нашим инстинктам, и меньшее число сейчас не кажется нам противоестественным, но соображения, изложенные в этом эссе, должны подготовить нас к любой возможности.

Часто говорят, что квантовые явления несовместимы с обычной механикой, и часто предлагаются доказательства этого утверждения. Я полагаю, что никакое такое доказательство в том духе, в котором обычно предпринимаются попытки, не может быть правильным, поскольку мне кажется, что применимо замечание Пуанкаре, а именно, что механическая система может имитировать любое поведение, при условии, что она достаточно сложна. Неопровержимое доказательство этого может быть предоставлено любому, кто не верит в витализм. Если

разумное существо можно рассматривать как механическую систему, нам просто нужно поместить внутри каждого атома демона Максвелла с инструкциями заставить атом реагировать в соответствии с квантовыми правилами. Вопреки духу такого рода редукции квантовых явлений к механическим терминам, мы должны помнить, что имеет смысл говорить о характере нашей концептуальной структуры только тогда, когда количество концепций сокращено до числа, имеющего независимое операционное значение, то есть до минимального числа.

Тем временем давайте рассмотрим, какое значение могут иметь в свете настоящего эксперимента утверждения, подобные тем, которые приписываются Бору, о том, что наши обычные концепции пространства и времени могут быть неприменимы при рассмотрении квантовых явлений. Этой идее часто придается более явная форма, согласно которой пространство и время могут быть существенно прерывистыми на квантовом уровне. С операционной точки зрения труднее всего понять, что именно означает это более четкое утверждение, по крайней мере, в терминах тех операций, с помощью которых первоначально были определены длина и время. Таким образом, если бы пространство было прерывистым, это могло бы означать, что существует точка, которой можно достичь, отложив метровую палочку, например, четырнадцать раз, и другую точку, отложив шестнадцать раз, но что ни одна точка не может быть найдена пятнадцатью применениями. Такое положение дел, по-видимому, несовместимо с нашим определением операции счета и не имеет отношения к каким-либо свойствам пространства; ибо что мы будем иметь в виду, откладывая измерительную палочку шестнадцать раз, если ее нельзя отложить пятнадцать раз? Вполне возможно, что пространство может закончиться в том смысле, что за определенным пределом может возникнуть какое-то неустранимое физическое препятствие для продолжения отсчета расстояний метровой палочкой (хотя я думаю, что мы должны быть склонны описывать такое положение дел в терминах материи, окружающей пустое пространство, а не как конец пространства), но говорить, что пространство может быть прерывистым, кажется бессмысленным. Точно так же я считаю бессмысленным говорить о прерывистом времени. Мы можем иметь явления, прерывистые в пространстве и времени, но не прерывистые в пространстве или времени.

Тогда, по-видимому, мы должны отказаться от идеи, что в квантовой области обычные концепции пространства и времени могут потерпеть неудачу, в том конкретном смысле, что они могут стать прерывистыми. Что мы можем понимать под несостоятельностью этих концепций в более общем смысле? Никто, конечно, не ожидал бы, что даже в конечном итоге эти концепции будут иметь такое же практическое значение для внутренней части атома, какое они имеют в обычном масштабе; это должно быть модифицированное понятие, которым мы занимаемся, такое, которое, как мы уже видели, задается уравнениями поля электродинамики. Если теперь количество операционально независимых концепций на квантовом уровне окажется таким же, как и на уровне обычного опыта, и если также существует возможность непрерывного перехода от операций квантовой области к операциям обычного опыта, то, как мне кажется, мы должны сказать, что наши обычные концепции пространства и времени все еще применимы в квантовой области. Но если количество операционально независимых концепций либо больше, либо меньше, чем на обычном уровне, тогда, я полагаю, мы должны сказать, что обычные концепции пространства и времени неприменимы. Можно все еще искать возможность выделить из комплекса понятий на квантовом уровне группу, которая могла бы непрерывно меняться, и заменить ее группой понятий пространства и времени на обычном уровне, но я думаю, что такая возможность очень маловероятна, если учесть, что общее количество понятий

меняется и что в зоне, где меняется количество, определения не уникальны, с помощью которых можно экстраполировать концепцию из одной области в другую.

Если верна идея Бора о том, что пространство и время нельзя использовать для описания конечных квантовых явлений, то одним из самых непосредственных следствий с точки зрения эксперимента может быть то, что явлений, соответствующих промежуточным положениям электрона между стабильными орбитами, не существует.

Наконец, мы должны прокомментировать общую тактику квантовой ситуации. Казалось бы, уже было предпринято достаточное количество безуспешных попыток сформулировать квантовое поведение в терминах обычной механики, чтобы оправдать ожидание того, что в конечном итоге должно развиться нечто совершенно иное. Трудности, связанные с неизменным переносом обычных механических представлений на квантовые явления, можно проиллюстрировать простым примером. Рассмотрим частицу массой m , вращающуюся по круговой дорожке без трения радиуса r . Тогда в соответствии с квантовыми условиями он может стабильно двигаться по этому пути только с определенными скоростями, такими, что $\int p dq = m v 2\pi r = n h$.

Предположим теперь, что частица вращается с одной из допустимых скоростей и к ней приложена касательная сила. Если обычные механические представления о силе все еще действительны, частица должна реагировать, двигаясь по своему пути с постоянно возрастающей скоростью. После того, как скорость была увеличена на небольшую величину, мы убираем силу. Теперь это движение больше не входит в число разрешенных, и частица должна каким-то образом изменить свою скорость; она должна либо замедлиться, либо ускориться. В первом случае он должен либо излучать энергию, на что, как мы предполагали, система простых механических свойств не способна, либо нарушается закон сохранения энергии, а также первый закон движения Ньютона в процессе достижения устойчивого состояния. Если, с другой стороны, частица ускоряется, она должна увеличивать свою энергию из ниоткуда, и опять же обычная механика здесь неприменима.

В таком случае представляется ошибкой пытаться сформулировать квантовые условия в терминах понятий обычной механики (координаты импульса и положения либо в обычном, либо в обобщенном лагранжевом смысле). С другой стороны, казалось бы, правдоподобно ожидать, что механика не является фундаментальной вещью, а в некотором роде является эффектом, производимым совокупным действием огромного числа элементарных квантовых процессов. Амплитуда радиационных колебаний, например, может быть таким статистическим аспектом очень многих процессов, примерно так же, как на обычном уровне опыта температура является статистическим аспектом средней кинетической энергии атомов. Одна возможность такого рода уже была указана более явно; в элементарном процессе испускания излучения частота и энергия не являются двумя независимо назначаемыми переменными, а связаны $[E = h\nu]$. То есть на квантовом уровне излучение обладает только одним свойством, которое в действительности не является ни энергией, ни частотой. [Сейчас мы пренебрегаем аспектом поляризации излучения.] На более высоком уровне, чем у обычного излучения, единственное элементарное свойство расширилось до двух (энергии и частоты) за счет дополнительной переменной числа элементарных квантовых процессов в комплексном излучении.

Программа ближайшего будущего должна быть продолжением чего-то подобного, а именно, изобрести новые концепции, соответствующие экспериментально независимым вещам на квантовом уровне (таким, возможно, как результат слияния концепций энергии и частоты для

излучения), а затем показать, как обычные концепции механики (и, весьма вероятно, также концепции пространства и времени) генерируются статистическими эффектами в совокупности больших чисел. Возможно, еще слишком рано предпринимать попытки такого рода, потому что может показаться, что все еще существует слишком много возможностей для новых экспериментальных открытий, которые могут опровергнуть результаты тщательно продуманных теоретических рассуждений. Если это действительно так, я полагаю, что физике следует на данный момент частично приостановить свою теоретическую деятельность в этой области и посвятить себя как можно более быстрому получению необходимых экспериментальных фактов. Мы можем еще раз подчеркнуть, что возможность выполнения этой правдоподобной программы может быть доказана только экспериментально; возможно, на квантовом уровне потребуется больше концепций, чем для обычного опыта.

Изобретение новых концепций, безусловно, нелегкое дело, и это то, от чего физика всегда намеренно и, возможно, оправданно уклонялась, как показывают настойчивые попытки перенести понятия механики в тончайшую структуру вещей. Это уклонение имело не плохие, а, наоборот, хорошие результаты, пока физика в первую очередь занималась явлениями, близкими к области обычного опыта, но я верю, что по мере того, как мы все дальше и дальше удаляемся от обычного опыта, изобретение новых концепций будет становиться все более насущной необходимостью.

ГЛАВА IV

ОСОБЫЕ ВЗГЛЯДЫ НА ПРИРОДУ

В этой последней главе мы предлагаем обсудить некоторые специальные гипотезы о структуре природы и некоторые другие вопросы, которые лучше всего отложить до тех пор, пока мы не изучим наши фундаментальные концепции.

Мы видели, что при установлении общих правил, которыми мы должны руководствоваться при описании и соотнесении природы, мы должны проявлять крайнюю осторожность, чтобы не допустить появления особых гипотез, поскольку в противном случае мы могли бы ограничить возможный будущий опыт. Даже здесь нет четкой границы, отделяющей общее от особенного, и человек мог бы запутаться в неразрешимых трудностях, если бы его идеалы были слишком скрупулезными. Как, например, ответить критику, который говорит: "Само ваше стремление сформулировать принципы настолько широкие, чтобы не ограничивать будущий опыт, означает, при рассмотрении в свете операций, что вы ищете принципы, которые, как предполагает *прошлый* опыт, не будут ограничивать будущее. По самой природе вещей невозможно избежать всех последствий прошлого опыта и, следовательно, найти какой-либо полностью общий принцип". Я полагаю, что мы должны признать, что критик прав, и что, строго говоря, наша цель недостижима. В частичную самозащиту мы можем сказать, что все обсуждение этого эссе было подчинено одному явному допущению, а именно, что работа нашего разума понятна, что, конечно, предполагает предположение, что наш разум продолжит функционировать в будущем так же, как и в прошлом. Даже с этой оговоркой мы не можем

строго избегать последствий прошлого, но не может быть никаких практических сомнений в том, что мы признаем определенные предположения о поведении природы настолько особенными, что серьезно ограничивают физические возможности, а другие предположения - менее ограничивающими. В предыдущем обсуждении нам пришлось сделать предположения, но я надеюсь, что все, кто имеет физический опыт, признают, что эти предположения настолько широки, что не будут серьезно ограничивать нас. Однако более специальные предположения или гипотезы находят очень широкое применение, когда мы пытаемся продвинуть вперед области экспериментальных знаний, поскольку они могут предложить новые эксперименты или помочь в сопоставлении уже полученной информации. Эти специальные гипотезы могут охватывать очень широкий диапазон общности; некоторые из них достаточно общие по своему характеру, чтобы их можно было обсудить здесь.

Среди этих специальных гипотез есть группа, которая играет важную роль в рассуждениях большинства физиков и у которой есть общие черты. Это: гипотезы о простоте природы, о конечности природы в направлении очень малого и об определенности будущего с точки зрения настоящего. То, что эти взгляды имеют точки схождения, очевидно, если мы рассмотрим гипотетический частный случай. Предположим, что никакая физическая структура, кроме электронов и протонов, не может быть обнаружена или даже предложена каким-либо известным явлением, так что все будущее поведение системы может быть определено спецификацией нынешних соотношений всех ее протонов и электронов; в этом случае природа была бы простой и конечной, а будущее определялось бы настоящим.

ПРОСТОТА ПРИРОДЫ

Из этих гипотез, возможно, наиболее важной является гипотеза о простоте природы из-за ее широкого распространения и влияния, которое она оказала на физическое мышление. Гипотеза простоты принимает несколько форм; некоторые физики убеждены, что законы, управляющие природой, просты, другие - что элементарный материал, из которого состоит природа, прост (возможно, протоны, электроны и энергия), или может быть сочетание обоих взглядов в убеждении, что в конечном итоге мы найдем простые элементарные элементы, ведущие себя в соответствии с простыми законами. В одном отношении очевидно, что природа не проста, а именно численно — попробуйте сосчитать электроны, атомы или звезды!

Рассмотрим теперь первый из этих аспектов тезиса о простоте, который может быть выражен как убежденность в том, что поведение всей вселенной может быть понято с помощью нескольких принципов большой широты и простоты, таких как закон обратных квадратов силы или второй закон термодинамики, или, возможно, еще лучше, равенство элементарных положительных и отрицательных зарядов, которое, по-видимому, выполняется с огромной степенью точности. В объяснении подобного взгляда, во-первых, есть ментальное побуждение, потому что мы можем получить почти эстетическое удовлетворение от созерцания такой вселенной, и, во-вторых, есть сильное внушение из опыта. Практически вся история физики - это история сведения сложного к более простому. Например, поведение значительной части мира непосредственного восприятия может быть сведено к простым законам механики.

Поведение другой очень большой группы природных явлений может быть сведено к термодинамике. Поведение небесных тел, которое сначала было довольно сложным образом описано в системе астрономии Птолемея, может быть сведено к тем же законам механики, которые мы находим в непосредственной близости от нас, с единственным добавлением универсального закона всемирного тяготения, который, как показывает более поздний усовершенствованный эксперимент, действительно действует в нашем непосредственном окружении. Аналогичным образом законы термодинамики (за исключением той части, которая касается излучения) сводятся к обычным законам механики посредством дополнительного предположения об атомной структуре вещества. Поистине колоссальное достижение, которое вполне может окрасить все наши перспективы на будущее. Здесь можно найти большое оправдание вере в то, что вся природа в конечном счете будет сведена к подобной простоте, и, в частности, оправдание попытке найти объяснение всей природы в действии механических законов. Теперь, конечно, с точки зрения физического и исторического факта, эта программа не могла быть реализована, но были обнаружены упрямые физические явления. Электрические явления, которые поначалу казались такими многообещающими, отказывались вписываться в схему, и обратная попытка объяснить механические эффекты в терминах электрических эффектов также провалилась. Мы все еще переносим наши обычные механические представления в область малых электрических эффектов и все еще говорим, например, о неэлектрических силах, которые удерживают электрон вместе. Также не существует экспериментов, дающих достаточные основания полагать, что вся масса положительного ядра имеет электрический характер. Мы также думаем об электрических зарядах как о свойстве идентифицируемости, которое включает в себя наличие острых краев и изменение закона силы на небольших расстояниях, и это, безусловно, свойство, перенесенное из нашего крупномасштабного опыта.

Таким образом, кажется совершенно очевидным, что законы природы не могут быть сведены ни к законам механики, ни к электричеству, ни, вероятно, как предполагают квантовые явления, к комбинации того и другого. Это, конечно, не исключает возможности того, что законы все еще могут быть простыми, когда они выражены в других формах. Примером такого широкого общего закона, который проникает глубже, чем механика или электродинамика, вероятно, является второй закон термодинамики, распространенный на явления излучения.

Примерами попыток найти другие такие простые законы являются Принцип подобия Толмена,[33] и теория конечных рациональных единиц Льюиса,[34] и его недавно опубликованная провозглашенный принцип полной обратимости.[35] Первые две из этих попыток, я не считаю успешными по причинам, которые я изложил в другом месте,[36] третья также кажется несколько сомнительной.

[33]Р. К. Толман, Phys. Rev. 3, 244-255, 1914; 6, 219-233, 1915; 15, 521, 1920; Жур. Амер. Химический журнал., 43, 866-875, 1921.

[34]Г. Н. Льюис. Том 15, 1921, Материалы Физической лаборатории Джефферсона, посвящается профессору Холлу, Кембридж, Массачусетс; Phil. Mag., 49, 739-750, 1925.

[35]Г. Н. Льюис, научный сотрудник. Акад. наук., 11, 179-183, 422-428, 1925.

[36]П. В. Бриджман, Phys. Rev. 8, 423-431, 1916; "Анализ размеров", стр. 105.

Что касается общего вопроса о простых законах, то существуют по крайней мере две точки зрения; первая заключается в том, что, вероятно, существуют еще не открытые простые общие законы, другая заключается в том, что природа склонна к простым законам. Я не вижу, как можно спорить с первым из этих подходов. Давайте рассмотрим второе. Прежде всего, мы должны заметить, что "простой" означает для нас "незатейливый", когда формулируется в терминах наших концепций. Этого самого по себе достаточно, чтобы выдвинуть предположение против такого общего подхода. Очевидно, что наше мышление должно следовать тем линиям, которые навязаны природой нашего мыслительного механизма: кажется ли вероятным, что вся природа принимает эти же ограничения? Если бы это было так, то наши представления должны были бы находиться в известных простых и определенных отношениях к природе. Теперь, если наше обсуждение и выявило что-то, так это то, что наши концепции не являются четко определенными вещами, но они туманны и не совсем соответствуют природе, и многие из них подходят даже приблизительно только в ограниченных пределах. Задача поиска концепций, которые адекватно описывали бы природу и в то же время были бы легко решаемы нами, то есть были бы простыми, является наиболее важной и трудной в физике, и мы никогда не достигаем более чем приблизительно и временного успеха. Рассмотрим пример со временем. Первоначальная концепция местного времени, которая долгое время казалась удовлетворительной, оказывается неадекватной, и ее приходится заменять расширенным временем, которое настолько сложно, что сомнительно, сможем ли мы когда-нибудь понять его с уверенностью, которой мы должны требовать от полезной концепции (под "пониманием" я подразумеваю интуитивное понимание всех последствий задействованных операций). До сих пор не найдено понятие, которое просто описывало бы временные отношения Вселенной.

Концепции не только расплывчаты по краям и поэтому не способны точно соответствовать природе, но всегда есть шанс, что существуют концепции, отличные от тех, которые мы приняли, которые соответствовали бы нашим нынешним явлениям. Поиск концепций, соответствующих природе, во многом подобен решению кроссворда. В головоломке могут быть некоторые части узора, которые мы заполняем полностью и легко, но иногда мы находим части, в которые мы можем вписать все, кроме одного или двух упрямых определений, так что мы уверены, что находимся на правильном пути, и ломаем голову в поисках недостающих слов, когда со вспышкой вдохновения мы видим, что упрямые слова могут быть вставлены путем полного изменения тех, которые мы уже приняли. Возможно, вскоре мы станем свидетелями аналогичного изменения в нашей концепции природы света. Важное различие между головоломкой с кроссвордами и природой заключается в том, что мы никогда не можем сказать, заполнили ли мы все квадраты в любой из частей головоломки природы; всегда существует возможность появления новых явлений, которых наша нынешняя схема не касается.

Таким образом, учитывая природу нашего концептуального материала, мне кажется, что подавляющее предположение противоречит законам природы, имеющим какую-либо предрасположенность к простоте, сформулированным в терминах наших концепций (что, конечно, и означает простота), и удивительно, что, по-видимому, существует так много простых законов. Следует сделать следующее наблюдение относительно всех простых законов природы, которые были сформулированы до сих пор; они применимы только в определенном диапазоне. Мы не распространили законы тяготения на малые тела и не обнаружили, что наши электрические законы будут работать в космическом масштабе. Не кажется таким уж удивительным, что в ограниченной области, в которой наиболее важные явления относятся к ограниченному типу, поведение природы должно следовать сравнительно простым правилам.

Заманчивый вопрос заключается в том, не могут ли существовать некоторые законы природы, которые *действительно* просты, независимо от нашего способа формулировки, такие как закон обратного квадрата. Я оставляю читателю решать, имеет ли этот вопрос смысл. В этой связи, возможно, важно, что средний физик странно неохотно вмешивается в закон обратных квадратов. Я нахожу в себе недостаток сочувствия, которое я не могу оправдать ни одним из соображений этого эссе, с попытками, подобными недавней работе Суонна,^[37] например, объяснить широкий спектр до сих пор упрямых эффектов предположением о слегка неравномерных отклонениях электронов и протонов от закона обратных квадратов. Конечно, я надеюсь, что это чувство окажется не предубеждением, а, возможно, будет оправдано каким-нибудь таким общим наблюдением, как то, что отклонение от закона обратных квадратов, столь незначительное, что по определению навсегда недоступно обнаружению прямым экспериментом, бессмысленно; но в этом я совсем не уверен.

^[37]W. F. G. Swann, Phys. Rev., 25, 253, 1925.

Теперь мы готовы рассмотреть второй аспект, в котором природа может быть простой, а именно, потому что материал, из которого она построена, может сводиться к нескольким видам элементов. В этом обсуждении будет удобно одновременно рассмотреть и более всеобъемлющую простоту, возникающую из простых законов, действующих на простые элементы. Непосредственный вопрос, стоящий перед нами здесь, касается факта: кажется ли, что природа становится внутренне проще по мере того, как мы приближаемся к мелкомасштабным явлениям? Здесь есть много места для расхождений во мнениях; лично я считаю, что эта ожидаемая простота не является очевидной, по крайней мере, в той степени, в какой мы могли бы пожелать. Например, тот факт, что электроны должны обладать как электрическими, так и механическими свойствами, является соломинкой в этом направлении.

Следует также помнить, что определенная имитация простоты неизбежна по мере приближения к границам экспериментального знания, какой бы ни была действительная структура природы, по той простой причине, что вблизи предела количество наших возможных экспериментальных операций становится меньше, а также и количество наших концепций. Таким образом, вопрос, на который мы пытаемся ответить, имеет свое реальное значение только в терминах возможного будущего. Верим ли мы, что если мы сделаем ставку на определенную точку на наших нынешних границах, то постепенно, по мере развития физики, эта точка будет приобретать все более богатый опыт, так что природа на этом этапе будет казаться все более сложной? Или мы ожидаем прекращения этого процесса расширения довольно скоро? Мне кажется, что в качестве экспериментального факта нет никаких сомнений в том, что вселенная на любом определенном уровне в среднем становится все более сложной и что область кажущейся простоты постоянно отступает. Это, однако, мнение не всех наблюдателей. Так, Бертран Рассел в книге "Во что я верю", стр. 10, пишет: "Таким образом, физическая наука приближается к той стадии, когда она станет завершенной и, следовательно, неинтересной".

Возможно, это особенно благоприятная эпоха в истории физики для того, чтобы подчеркнуть существенную сложность природы, потому что все наши новые квантовые явления указывают на огромное богатство доселе неожиданных взаимосвязей на самом краю достижимого. Существует один аспект квантовых отношений, как и наших представлений о природе структуры ядра атома, который особенно важен в этом отношении, а именно то, что мы должны описывать явления статистическими методами. В настоящее время статистический метод

используется либо для сокрытия огромного количества фактических невежеств, либо для сглаживания деталей огромного количества фактических физических сложностей, большинство из которых несущественны для наших целей. Не может быть никаких сомнений в степени невежества, которую скрывает статистический метод применительно к этим явлениям, но есть также убедительные указания, особенно применительно к ядру, на то, что он охватывает огромное количество реальных физических осложнений. Ядро атома радия становится нестабильным в среднем каждые 10^4 года, что может быть правдоподобно истолковано как указание на то, что каждые 10^4 года ядро радия приобретает определенную конфигурацию. Принимая во внимание временной масштаб, в котором, как мы предполагаем, происходят события в атоме, а также принимая во внимание тот факт, что радиоактивный распад, по-видимому, не подвержен влиянию внешних факторов, это указывало бы на совершенно ужасающий объем структуры. Точно так же мы прибегаем к статистическим методам в квантовой теории, как, например, в анализе Эйнштейном деталей равновесия между испускающими и поглощающими атомами и излучением.

В общем, мы ни на минуту не можем допустить, что статистический метод, если только он не используется для сглаживания несущественных деталей, может когда-либо обозначать нечто большее, чем временную стадию нашего прогресса, потому что предположение о событиях, происходящих по чистой случайности, представляет собой полное отрицание нашего фундаментального предположения о взаимосвязанности; такие статистические методы всегда указывают на наличие физических сложностей, которые в конечном итоге должны быть нашей целью.

Таким образом, представляется, что существующие экспериментальные данные делают весьма вероятными структуры за пределами электрона и кванта; мы можем пойти еще дальше и сказать, что нет экспериментальных доказательств того, что последовательность явлений в природе по мере продвижения ко все меньшим масштабам является завершенной последовательностью или что капля воды сама по себе не является по существу бесконечной. (Это утверждение подразумевает значение, которое мы придаем бесконечности.) Тем более нет никаких доказательств того, что природа сводится к простоте по мере того, как мы углубляемся в мелкий масштаб.

Каким бы ни было чье-либо мнение относительно простоты законов или материальной структуры природы, не может быть сомнений в том, что обладатели некоторой подобной убежденности имеют реальное преимущество в гонке за физическими открытиями. Несомненно, есть много простых связей, которые еще предстоит обнаружить, и у того, кто твердо убежден в существовании этих связей, гораздо больше шансов найти их, чем у того, кто совсем не уверен в их существовании и просто ищет все, что может подвернуться. Это в значительной степени вопрос психологии. Всем известно, что простого предположения о том, что у проблемы есть решение, или знания о том, что кто-то уже решил ее, часто бывает достаточно, чтобы предположить связь, которую в противном случае можно было бы и не заметить. Таким образом, есть вероятность, что связи между явлениями будут обнаружены теми, кто ранее был убежден в том, что эти связи существуют. Наблюдение за тем, что большинство открытий совершается людьми с определенными убеждениями, естественным образом укрепляет веру в истинность их убеждений. Но у этой картины есть обратная сторона. Человек, который убежден, что есть связь там, где ее нет, может тратить все свое время на тщетные поиски. При условии, что природа не имеет особой предрасположенности к простым

отношениям, убежденность в том, что такие отношения существуют, с точки зрения любого отдельного индивида, может быть как помехой, так и помощью. С другой стороны, с точки зрения физического общества желательно, чтобы были такие убеждения, поскольку в таком обществе будет больше открытий, чем в обществе без таких убеждений. Здесь мы снова сталкиваемся со старым конфликтом между индивидом и обществом. Как и во всех других подобных конфликтах, общество не сможет постоянно требовать от индивида принятия каких-либо убеждений или вероучений, которые не являются истинными, независимо от того, какую выгоду это принесет обществу другими способами. Если природа не проста, физики не будут продолжать верить, что это так, даже если такое убеждение действительно увеличит общее количество открытий. Ожидать, что кто-то сможет придерживаться такого отношения, невозможно. Означает ли это тогда, что физику ждет серое будущее, становящееся все более прозаичным, с все более редкими новыми открытиями, совершаемыми постоянно уменьшающимся числом введенных в заблуждение, но удачливых энтузиастов? Такая опасность может существовать, но большей части опасности можно избежать, если четко осознать ее природу. Одной из проблем будущего является осознанная разработка более мощной техники для открытия новых отношений без необходимости в предвзятых мнениях со стороны наблюдателя.

Здесь есть аспект наших физических исследований, который часто упускается из виду, а именно небольшая доля успешных открытий по сравнению с количеством исследователей. Конечно, количество неудачных попыток, даже у тех счастливиц, которые совершают великие открытия, намного превышает количество их успешных попыток. (На ум приходит предполагаемое удовлетворение Фарадея доходностью в 20%.) Это всегда следует принимать во внимание при оценке вероятных шансов на правильность любой новой теории. При таком количестве физиков, работающих над разработкой новых теорий, высока вероятность того, что будет найдено много ложных теорий, в которых ряд явлений, по-видимому, могут сочетаться в новой взаимосвязи, но которые в конечном итоге оказываются несовместимыми с другими явлениями, так что от предложенной теории приходится отказаться. По мере развития физики и увеличения числа исследователей и объема физического материала приходится быть все более и более требовательным в своих требованиях к новой теории. Особенно остерегаться числовых совпадений. Можно было бы написать интересную главу о числовых соотношениях, которые, как мы надеялись, были опубликованы, но позже от них пришлось отказаться как от не имеющих значения.

ДЕТЕРМИНИЗМ

Если мы правы, полагая, что физические доказательства не подтверждают идею о том, что природа конечна снизу вверх, мы не только отвергли тезис о простоте, но и сделали очень важное наблюдение по поводу другого общего тезиса, упомянутого в начале этой главы, а именно тезиса о физическом детерминизме. Под детерминизмом мы понимаем веру в то, что будущее всей вселенной или изолированной ее части определяется в терминах полного описания ее нынешнего состояния. [Что мы подразумеваем под нынешним состоянием, будет

обсуждено позже.] Широко распространено мнение, что каждый физик придерживается какого-либо подобного тезиса. Но теперь, если существует бесконечная структура даже в небольшой изолированной части Вселенной, полное описание ее невозможно, и от изложенной доктрины следует отказаться. Мне кажется, что все существующие физические доказательства готовят нас к тому, чтобы признать эту возможность. Я полагаю, однако, что большинство физиков согласились бы с некоторой модификацией исходного тезиса, возможно, примерно в следующем духе. Если дать описание изолированной части физической вселенной в наиболее полных терминах, имеющих физический смысл, то есть вплоть до мельчайших элементов, о которых нам сообщают наши физические операции, то будущая история системы определяется в пределах определенной полутени неопределенности, которая становится все шире по мере того, как мы проникаем во все более мелкие детали структуры системы или с течением времени, пока, в конце концов, все, кроме некоторых очень общих свойств исходной системы, таких как ее общая энергия, навсегда не теряются в дымке, и мы имеем систему, которая была непредсказуемой. Я полагаю, что это еще одно убеждение, по крайней мере, многих физиков в том, что при достаточном уточнении наших измерений количество дымки в любой фиксированной точке в будущем может стать бесконечно малым, и многие могли бы даже пойти дальше и надеяться, изучая дымку (возможно, статистически), получить какие-то логические доказательства структуры, выходящие за рамки того, что пока испытывается. На самом деле, возможно, что в этом последнем содержатся зачатки окончательного метода исследования, если мы когда-нибудь достигнем стадии, когда уже не сможем совершенствовать наши методы измерения.

Детерминизм для физика - это просто способ сформулировать определенные следствия из его убежденности в взаимосвязанности природы. Мы видели, что максимально широкое утверждение тезиса о связности звучит так: если даны две изолированные системы с идентичными прошлыми историями вплоть до определенной эпохи, то будущие истории также будут идентичны. Тезис о детерминированности будущего настоящим представляет собой специализацию этого общего тезиса в том смысле, что мы предполагаем, что идентичность всей прошлой истории не необходима для идентичности будущего поведения, а только идентичности нынешнего состояния. Общий и специальный тезис никоим образом не эквивалентны: если прошлые истории идентичны, то и нынешние условия также идентичны, но обратное вовсе не обязательно справедливо.

Теперь я полагаю, что общий тезис (который, я полагаю, признают все физики, но истинность которого, тем не менее, подлежит проверке опытом) превращается в специальный тезис благодаря чувству несколько метафизического содержания, которое мы, возможно, можем сформулировать, сказав, что мы не видим способа, которым прошлое может влиять на будущее, кроме как через настоящее. Нам не нравится думать о том, что причина, находящаяся далеко в прошлом, перескакивает через настоящее и влияет на будущее, вообще не касаясь настоящего. Это аналог того состояния ума, при котором действие на расстоянии в пространстве немыслимо; точно так же, как трудно представить себе тело здесь, воздействующее на тело там, без того, чтобы каким-то образом действие не распространялось через промежуточное пространство, так и нам не нравится думать о прошлой причине, перескакивающей через время и производящей будущий эффект без какой-либо непрерывности в причинной цепи на протяжении всего промежуточного времени.

До сих пор наше обсуждение было намеренно размытым: очевидно, что то, что мы подразумеваем под "нынешним состоянием", требует определения. То, что под этим подразумевается, может в некоторой степени зависеть от конкретной гипотезы, которую человек принимает относительно структуры природы. Исторически убежденность в детерминизме будущего была наиболее тесно связана с механической картиной структуры вселенной, так что, возможно, было бы неплохо начать с этой точки зрения. Предположим простейшую из возможных систем, состоящую из точечных масс без структуры, как в кинетической теории газов. Какие спецификации мы считаем необходимыми для определения текущего состояния такой системы? Механический взгляд на природу дает определенный ответ. Под текущим состоянием мы подразумеваем положения и скорости всех масс. Этого достаточно для полного определения любой чисто механической системы, в которой силы между элементами являются известными функциями только от их взаимного расположения. В качестве своего рода расширения этих идей, применимых к механическим системам, по-видимому, часто считается, что текущее состояние *любой* системы определяется полным описанием положений и скоростей всех конечных элементов системы (при условии, конечно, что это число конечно). Однако этот принцип, по-видимому, не поддается проверке экспериментом, когда применяется к электрическим системам с излучением. Теоремы о запаздывающем потенциале показывают, что такие системы определяются текущим положением и скоростями зарядов в непосредственной близости и соответствующими данными в удаленных точках, приведенными для соответствующих эпох в прошлом; следовательно, в этом случае для определения будущего необходима прошлая и настоящая история. Но если мы рассматриваем электрическое поле как часть системы, мы можем определить будущее в терминах текущего положения зарядов, их скоростей и значений векторов поля по всему пространству, возвращаясь таким образом к определенному формальному сходству с механическими системами и предлагая причину для приписывания физической реальности электрическому полю. Однако эта аналогия с механической системой является расплывчатой; полная аналогия позволила бы также задать мгновенные значения производных поля по времени, а это невозможно.

Как получается, что скорость можно строго рассматривать как характеристику *текущего* состояния системы? Конечно, обычные операции по измерению скорости требуют, чтобы мы знали конфигурацию системы в два разных момента времени и вычисляли скорость исходя из определенных различий системы в эти два момента времени. Скорость определяется как предельный результат, но даже в этом пределе не исчезает существенный физический факт, что мы должны знать положения системы в два момента времени. Теперь мы можем пойти дальше; если скорость должным образом включена в существующие атрибуты системы, мы не видим причин для того, чтобы не включать также спецификацию всех старших производных по времени. В случае рассматриваемой в настоящее время простой газовой системы мы можем ответить на этот вопрос, изучив операции, с помощью которых мы фактически приступаем к работе по определению будущего такой системы. Задача определения будущего состояния такой системы сводится к задаче написания дифференциальных уравнений движения всех ее частей. Если система представляет собой механическую систему, как в данном случае, эти уравнения имеют второй порядок по производным по времени от координат положения, а также включают силы, которые, как мы предполагаем, известны в терминах взаимного расположения частей системы. Таким образом, учитывая положения и то, каким образом силы зависят от взаимного расположения частей, уравнения движения могут быть записаны для любой

конфигурации системы, и эти уравнения могут быть интегрированы (по крайней мере, приблизительно) в терминах надлежащих начальных условий. Теперь единственными граничными условиями для уравнения второго порядка являются начальные положения и скорости. Это причина того, что скорости должны быть указаны при описании текущего состояния системы, и что нет необходимости указывать более высокие производные. Очевидно, причина, по которой мы инстинктивно включаем скорость в число текущих свойств системы, заключается не в том, что скорость по своей природе является строго текущим свойством элементов системы, а скорее в том, что наш обширный опыт работы с механическими системами показал, что на самом деле скорость необходима в таких системах для определения будущего движения.

Но теперь, если уравнения движения частей системы не являются уравнениями механики, они в целом будут намного сложнее по внешнему виду и будут включать более высокие производные по времени, чем вторые. Предположим на данный момент, что уравнения содержат только производные и взаимные положения частей системы. Затем, чтобы интегрировать уравнения и определить движение, мы должны знать начальные положения и начальные значения всех производных с точностью до порядка на единицу ниже самого высокого значения, которое встречается в уравнениях. Уравнения движения электрона еще более сложны, чем это, в том смысле, что положения удаленных частей системы должны быть заданы в течение определенного интервала времени, а не просто мгновения. Казалось бы, ощущение, что текущее состояние системы может быть определено в терминах положений и скоростей, на самом деле неприменимо ко всем системам, с которыми мы сталкиваемся.

Обсуждение до этого момента основывалось на фундаментальном предположении, что поведение системы полностью определяется, если мы можем задать положение каждой части как функцию времени. Это предположение неявно содержится в формулировке Эйнштейном общего принципа относительности, а именно, что в физической системе нет ничего большего, чем набор пространственно-временных совпадений, и что система фиксирована в терминах пространственно-временных координат всех ее частей. Уже при обсуждении предположения об относительности мы указали причины неудовлетворенности этим как средством воспроизведения всего опыта, потому что, давая только пространственно-временные координаты событий, мы полностью опустили описательный фон уравнений, который придает физическую окраску рассматриваемой системе. В этом обсуждении также предполагается, что возможно определение положений, скоростей и более высоких производных (при необходимости) элементов системы, что по существу равносильно предположению, что система содержит только конечное число элементов. Теперь, принимая во внимание экспериментальный факт, что нет никаких оснований предполагать, что структура вселенной конечна, этот вывод должен быть изменен, но я не верю, что необходимая модификация влияет на основной аргумент. Ввиду возможной бесконечной структуры, казалось бы, мы не можем ожидать большего, чем то, что будущее определяется настоящим в пределах определенной полутени неопределенности, и эту полутень можно сделать менее важной, углубившись в структуру при определении текущего состояния.

Мы также коснулись двусмысленностей в "текущем" состоянии, когда система распределена по пространству. Вероятно, однозначное придание значения слову "настоящее" невозможно для расширенной системы, но теория относительности указывает по крайней мере на одну возможность. Представьте себе штат помощников, распределенных по всему пространству,

каждый из которых оснащен часами, синхронизированными и настроенными на основные часы обычным способом с помощью световых сигналов, и каждый полностью оснащен необходимыми измерительными приборами. Тогда то, что мы подразумеваем в этой части аргументации под "текущим" состоянием системы, представляет собой совокупность всей информации о *положениях* и *скоростях* конечных элементов, которые я определяю в непосредственной близости от меня в начале отсчета времени, плюс отчеты об аналогичных наблюдениях, сделанных всеми помощниками, при этом каждое локальное наблюдение производится в начале отсчета времени каждого локального отсчета времени.

Возвращаясь теперь к основному аргументу, мы показали, что ощущение, что текущее состояние Вселенной может быть определено в терминах положений и скоростей, возникло из опыта работы с чисто механическими системами, и что более общая формулировка, в которой мы добавляем к скоростям более высокие производные по времени, применима только к системам, в которых конечные элементы движутся в соответствии с дифференциальными уравнениями более высокого порядка, чем второй. Более того, наш анализ, по-видимому, показал, что системы, в которых присутствует излучение, не позволяют определять будущее в терминах настоящего состояния, определенного в таких терминах, как эти. Представляется, однако, что общий принцип детерминизма будущего настоящим может быть сохранен изменением определения того, что мы подразумеваем под текущим состоянием системы, избавлением от его механических и других специальных последствий и установлением более непосредственной связи с прямым экспериментом. Давайте понимать под текущим состоянием системы совокупность всей информации, которая может быть получена любыми физическими средствами, с помощью любого физического инструмента, не пытаюсь извлечь из этого анализа информацию о гипотетических конечных физических элементах, при условии, что измерения должны быть произведены сейчас, распространяя понятие "сейчас" на точки, удаленные в пространстве способом, указанным выше. С таким общим определением значения слова "присутствует" мы теперь можем иметь дело с системами, в которых присутствует излучение, заметив, что наши помощники-наблюдатели должны быть размещены в кажущемся пустым пространстве, а также по соседству с материей. О том, что это адекватно охватывает случай излучения, свидетельствует повторное рассмотрение двух систем затемненных фонарей с экранами и дальними зеркалами, которые мы рассматривали ранее, причем в одной системе световой сигнал был отправлен 0,5 секунды назад, а в другой - 1,5 секунды назад. Наш тезис требует, чтобы в этих двух системах была какая-то нынешняя разница, потому что их будущая история различна: в одной из них световой сигнал поступает по истечении 1,5 секунды, а в другой - всего через 0,5 секунды. Теперь, как сообщают наши ассистенты, существует разница, поскольку ассистент, находящийся на полпути между фонарем и зеркалом, сообщает в одной системе о вспышке света на той стороне экрана, которая обращена к фонарю, а в другой системе - на той стороне экрана, которая обращена к зеркалу.

Эта более общая точка зрения отвечает на вопрос, можно ли рассматривать скорость как существующий атрибут системы, поскольку части системы, находящиеся в движении, обладают импульсом, а импульс можно обнаружить, приложив к таким частям сравнительно жесткие элементы, которые будут подвергаться незначительной деформации, так что скорость имеет значение с точки зрения физических измерений, выполненных в один момент времени.

Здесь возникает тонкий и трудный вопрос, а именно, сможем ли мы когда-либо избавиться от временных последствий, говоря об операциях измерения, и, следовательно, можно ли

правильно описать состояние системы, в котором сохраняются временные последствия, как "настоящее". Я не буду пытаться ответить на этот вопрос: должен быть какой-то практически удовлетворяющий ответ, включающий, возможно, физический аналог дифференциалов разного порядка в математике, за исключением доведения анализа до такой степени утонченности, что понятие настоящего теряет смысл, что, как мы видим, может легко произойти.

С таким расширенным пониманием того, что мы подразумеваем под нынешним состоянием системы, мне кажется, что физические доказательства теперь скорее подтверждают точку зрения о том, что настоящее определяет будущее, при условии уточнения относительно полутени, по крайней мере, в том, что касается крупномасштабных явлений. Это кажется гораздо более сомнительным, когда мы переходим к мелкомасштабным явлениям, и, в частности, сомнительно, может ли этот принцип быть применен к деталям квантового процесса, и на самом деле нет уверенности, что он имеет смысл. Несомненно, что если это правда, то подразумевается огромное количество структур, превосходящих все, что еще было обнаружено.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛНОГО ОПИСАНИЯ ПРИРОДЫ В ТЕРМИНАХ АНАЛИЗА

Существует определенный тезис, который слабо связан с точкой зрения о том, что природа конечна снизу вверх, а именно, что возможно объяснение вселенной, при котором мы начинаем с мелкомасштабных вещей и объясняем крупномасштабные явления в терминах их мелкомасштабных составляющих, тезис, другими словами, о том, что все свойства большого содержатся в свойствах малого и что большое может быть построено из малого. Какой-то подобный тезис, по-видимому, подразумевается в общей позиции многих физиков. Давайте рассмотрим физическую основу этого. Для поддержания этого тезиса потребовалось бы, чтобы совокупности вещей никогда не приобретали свойств в силу своего количества, которыми они уже не обладают как индивиды. Верно ли это? Рассмотрим, например, двумерную геометрию на поверхности сферы. Это неевклидова геометрия. Является ли геометрия отдельных элементов поверхности сферы неевклидовой, или они приобретают это свойство при изменении масштаба? Является ли кинетическая энергия нескольких электронов, движущихся вместе таким образом, что они образуют электрический ток, суммой кинетических энергий отдельных электронов, или есть дополнительный член? Равна ли масса электрона сумме масс его элементов?

Здесь наводит на размышления математическое соображение. Те свойства системы, которые могут быть описаны в терминах линейных дифференциальных уравнений, обладают свойством аддитивности; эффект ряда элементов представляет собой сумму эффектов по отдельности, и в совокупности не появляются никаких новых свойств, которых не было в отдельных элементах. Но если существуют комбинированные термины (как в электрической энергии, которая содержит квадрат поля), то сумма больше (или отличается от) ее частей, и в совокупности могут появиться новые эффекты. Конечно, линейное уравнение имеет огромное значение для описания природы, но можно найти множество примеров систем с другими типами уравнений, например,

приведенное выше для электромагнитной массы. Ожидая обнаружить в природе такие неаддитивные эффекты, нам вовсе не нужно придерживаться мнения, что природа управляется дифференциальными уравнениями, но по аналогии можно ожидать аналогичных эффектов, если, например, разностные уравнения окажутся фундаментальными или даже чем-то, выходящим за рамки современной математической формулировки.

Безусловно, намного проще управлять системой физически, если общее действие может быть построено из действий ее частей, потому что анализ, который устанавливает связь между элементами, легче выполнять. Очевидно, что легче показать, что объяснение в таких терминах является правильным, потому что мы видели, что объяснение предполагает проведение экспериментов с отсутствующими или измененными репрезентативными элементами, и легче варьировать мелкие вещи, чем крупные. Поэтому те объяснения, которые предполагают работу с самого начала, будут даны первыми и окажутся непропорционально важными. Места, где я ищу объяснение от большого к малому, возможно, заключаются в учете значений гравитационной постоянной и скорости света, а также в тех явлениях, которые, как указывает общая теория относительности, могут зависеть от всей материи во Вселенной, как в эксперименте Фуко с маятником. Мы, конечно, также должны быть готовы к таким нелинейным эффектам в области неизученных квантовых явлений.

ПРОБЛЕСКИ ВПЕРЕДИ

Можно со значительной долей вероятности ожидать, что некоторые из общих соображений этого эссе сыграют определенную роль в будущем как спекулятивной, так и экспериментальной физики. Наиболее важного эффекта можно ожидать от более четкого осознания операционного характера наших физических концепций. Действительно, во время написания этого эссе очень заметно усилился акцент на необходимости понимания в терминах физических операций таких фундаментальных концепций, как концепция электрона, с помощью новой квантовой механики [механика Гейзенберга-Борна и Шредингера 1925-26 гг.].

Таким образом, в первую очередь нам следует ожидать более осознанного и детального анализа операционной структуры всех наших физических концепций. [Даже попытка систематического и тщательного анализа этого персонажа выходила за рамки данного эссе.] Этот будущий анализ точно покажет, как по мере расширения диапазона опыта меняется физический характер операций, с помощью которых мы определяем наши концепции, поскольку, например, в механике понятие силы исчезает при высокой скорости и, возможно, заменяется понятием импульса. В области изменения природы наших концепций будет проведено специальное исследование точности наших физических измерений и разработаны новые эксперименты большей точности, чтобы мы могли точно знать, до какой степени новые концепции эквивалентны старым. Прошлый опыт подсказывает, что мы, возможно, можем ожидать обнаружения новых явлений, особенно в тех регионах, где трудность выполнения обычной операции вынуждает нас изменить операциональный характер наших концепций. Придется отвечать на вопросы более или менее формального характера, как, например,

наилучший способ расширения концепций, когда перед нами открыто несколько возможных курсов.

Однако мы можем ожидать более интересных результатов, когда выйдем настолько далеко за рамки обычного опыта, что характер возможных физических операций станет настолько ограниченным, что приведет к очевидному уменьшению числа независимых концепций. Представляется правдоподобным ожидать, что структура природы более фундаментально связана с количеством независимых концепций, необходимых для полного описания, чем с точными деталями структуры отдельных концепций, такими, например, как то, измеряется ли пространство оптически или тактильно. В тех областях, где количество понятий уменьшается, мы должны провести самое тщательное экспериментальное исследование, чтобы обнаружить, если возможно, новые виды операций, с помощью которых количество понятий может быть возвращено к норме. При поиске таких новых экспериментальных операций мне кажется, что наибольшие перспективы на ближайшее будущее открываются за счет улучшения наших возможностей в работе с отдельными атомными и электронными процессами, такими, какими мы сейчас в ограниченной степени располагаем в различных спинтарископических методах подсчета радиоактивных распадов или в экспериментах Уилсона с β -треком.[38] В этом сознательном поиске явлений, которые увеличивают количество операционально независимых концепций, мы можем ожидать найти мощный систематический метод, направляющий открытие новых и по существу важных физических фактов.

[38]К. Т. Р. Уилсон, профессор, Рой. Соч., 87, 277, 1912.

Мы можем только предполагать, окажется ли невозможным дальнейшее увеличение числа фундаментальных концепций или нет, но нынешний опыт, по-видимому, придает большую вероятность мнению о том, что по мере нашего проникновения глубже количество фундаментальных концепций всегда будет иметь тенденцию уменьшаться. У нас, безусловно, уже есть один пример того, как концепция температуры исчезает, когда мы переходим к атомному масштабу величины, и, возможно, второй пример построения отдельных концепций энергии и частоты путем комбинации больших чисел той единственной операционально простой вещи, которая характеризует элементарный квантовый процесс в обычном излучении.

В переходной зоне, где меняется число, возможны различные виды отношений между понятиями. Мы можем обнаружить, что другие примеры подобны примерам температуры, которая является просто статистическим эффектом огромного количества явлений, которые могут быть описаны индивидуально в терминах обычных понятий механики, так что в этом случае количество понятий меняется просто из-за снижения температуры, оставляя остальные более или менее незатронутыми. Или же все понятия могут быть более тесно переплетены, так что при изменении общего числа понятий может оказаться невозможным выделить группу понятий, определяющие операции которых остаются неизменными. В таком случае мы должны сказать, что исходные концепции неприменимы на новом уровне. О самом непосредственном применении этой идеи уже упоминалось, а именно к концепциям пространства и времени. Если операции, с помощью которых измеряются пространство и время в обычной шкале величин, не могут быть перенесены в целом в область квантовых явлений, то мы должны сказать, что обычные концепции пространства и времени неприменимы к этим явлениям.

Тесно связанный с более четким анализом операционной структуры наших концепций, мы можем ожидать в будущем также более тщательного анализа наших изобретений. Это примет форму поиска новых физических фактов, которые придадут нашим изобретениям характер физической реальности. В случае, если длительные поиски не приведут к раскрытию таких явлений (как, вероятно, сейчас происходит с полевой концепцией электродинамики), мы должны тогда найти какой-то способ явного воплощения в нашем мышлении того факта, что мы имеем дело с чистыми изобретениями, а не с реальностью.